

Katarina Sandberg

Jarrutusenergian talteenotto Helsingin metro- ja raitioliikenteessä

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 20.04.2015.

Työn valvoja:

Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaaja:

DI Artturi Lähdetie

Tekijä: Katarina Sandberg

Työn nimi: Jarrutusenergian talteenotto Helsingin metro- ja raitioliikenteessä

Päivämäärä: 20.04.2015

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 6+55

Sähkötekniikan ja automaation laitos

Professuuri: Sähköjärjestelmät

Koodi: S-18

Valvoja: Prof. Matti Lehtonen

Ohjaaja: DI Artturi Lähdetie

Helsingin raitio- ja metroliikenteen on tarkoitus laajentua huomattavasti vuoteen 2025 mennessä. Liikennöintimäärien ja energiankulutuksen kasvaessa jarrutusenergian talteenoton kannattavuutta on ajankohtaista kartoittaa uudelleen. Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää Helsingin kaupungin liikennelaitoksen (HKL) metro- ja raitioliikenteen jarrutusenergian hyödyntämistavat tällä hetkellä, sekä arvioida jarrutusenergian hyötykäyttömahdollisuuksia tulevaisuudessa.

HKL:n järjestelmissä sekä raitio- että metrovaunut hyödyntävät jarrutusenergiaa tällä hetkellä jollain tavalla. Tyypillisin tapa on jarrutusenergian vieminen jarruvastuksille ja sitä kautta energian hyötykäyttö lämmitykseen. Raitiovaunuilla kaksi uusinta vaunutyyppiä syöttää energiaa myös raitiovaunun syöttöverkkoon, mutta vain jos samalla syöttöjaksolla on toinen vaunu kiihdyttämässä samaan aikaan. Käytännössä tämä on kuitenkin hyvin epätodennäköistä, sillä syöttöverkko on jaettu useisiin jaksoihin.

Työn yhteydessä myös arvioitiin MLNRV I -tyyppisen matalalattiaisen nivelraitiovaunun jarrutusenergian määrää mittaamalla jarruvastuksen läpi kulkevaa virtaa sekä jarrutusenergian hyötykäytön tehokkuutta mittaamalla säätöpellin asentoa. Mittausten perusteella todettiin, että hyödyntämiskelpoista jarrutusenergiaa saadaan 26 % vaunun ottamasta kokonaisenergiasta. Jarrutusenergian kertymisen tehokkuus pienenee huomattavasti jarrutuksen tapahtuessa alle 25 km/h nopeudesta. Mittauksissa huomattiin myös, ettei säätöpellin ohjausasetuksia ole aseteltu optimaalisesti.

Työssä tutkittiin myös eri energiavarastotyyppien soveltuvuutta raideliikenteen jarrutusenergian talteenottoon, sekä tutkittiin mahdollisten investointien kannattavuutta. Parhaiten energiavarastoista raideliikenteen käyttöön soveltuvat superkondensaattorit ja vauhtipyörä. Kannattavuuslaskelmien pohjalta kuitenkin todettiin, että kustannustehokkuuden kannalta energiavarastoihin investointi ei ole nyt eikä lähitulevaisuudessa kannattavaa.

Avainsanat: metro, raitiovaunu, jarrutusenergian talteenotto, energiavarasto

Author: Katarina Sandberg

Title: Regenerative braking in Helsinki metro and tram systems

Date: 20.04.2015

Language: Finnish

Number of pages: 6+55

Department of Electrical Engineering and Automation

Professorship: Electrical Systems

Code: S-18

Supervisor: Prof. Matti Lehtonen

Advisor: M.Sc. (Tech.) Artturi Lähdetie

The metro and tram networks of Helsinki are going to expand significantly by the year 2025. With growing network and increasing number of trams and metro trains the energy consumption is going to grow as well, and thus this a good time to reinvestigate the possibilities for using braking energy. This study was made for Helsinki City Transport (HCT) and the aim was to examine the current situation of using the braking energy in HCT's systems and explore the future possibilities.

In HCT's tram and metro systems, braking energy is already used to some extent. In most cases the braking energy is transformed in the brake resistors as heat. This heat is then used to warm the passenger cabin of the train if needed. The two newest tram types can feed the braking energy back to the feeding network, but only if there is another tram accelerating at the same time. In reality this is highly unlikely as the feeding network has been divided into many smaller parts.

In this study, the actual braking energy of the MLNRV I tram type was estimated using current measurements. The phase of the control plate was also measured to quantify the amount of heat used to warm the passenger cabin. Based on the measurements the reusable energy content was 26 % of the energy the tram uses. The recuperation energy is reduced significantly when the tram brakes from a speed lower than 25 km/h. The results also showed that the heating system operation is not optimal and thus it needs to be optimized.

Different types of energy storages are shortly introduced in this study and a simple feasibility analysis is also included. The best energy storage types for tram and metro systems are the supercapacitor and the flywheel. The conclusion based on the feasibility analysis is that the energy storages are not yet a profitable and viable option.

Keywords: metro system, tram system, regenerative braking, energy storage

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Helsingin kaupungin liikenteen (HKL) Infrapalvelut-yksikön kehittämistiimissä.

Kiitän ohjaajaani Artturi Lähdetietä mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta aiheesta sekä asiantuntevasta ohjauksesta. Kiitokset myös työn valvojalle, professori Matti Lehtoselle, kommenteista ja ohjeistuksesta. Kiitän kaikkia HKL:n työntekijöitä, jotka ovat auttaneet työhön liittyvissä asioissa, erityisesti Pekka Varista ja Teemu Niippaa, joiden suuri mielenkiinto työhön liittyviä mittauksia kohtaan oli korvaamatonta. Lisäksi kiitän mittauksiin osallistuneita Helen Oy:n työntekijöitä.

Lähes seitsemän vuotta Otaniemessä on kulunut yhdessä hujauksessa, tuntuu kuin vasta äsken olisi tänne fuksina taapertanut. Suurin kiitos näistä unohtumattomista vuosista kuuluu kavereille, erityisesti smurffeille ja #awesomefriends:lle. Kiitos myös perheelleni, erityisesti isälleni, joka aikoinaan patisti päivän ensimmäisestä pääsykokeesta uupuneen abin iltapäivän TKK:n matematiikan pääsykokeeseen. Erityiskiitos Tuukalle tuesta, tsemppauksesta ja hyvän ruuan kokkaamisesta.

Otaniemessä 12.4.2014

Katarina Sandberg

Sisällysluettelo

Tiivistelmä suomeksi	ii
Tiivistelmä englanniksi	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vi
1 Johdanto.....	1
2 Helsingin raitioliikenne	3
2.1 Raitiovaunukalusto.....	4
2.2 Sähkönsyöttöjärjestelmä.....	6
2.3 Jarrutusenergian hyödyntäminen tällä hetkellä.....	9
3 Helsingin seudun metroliikenne	12
3.1 Metrokalusto	14
3.2 Sähkönsyöttöjärjestelmä.....	17
3.3 Jarrutusenergian hyödyntäminen tällä hetkellä.....	19
4 Jarrutusenergian hyödyntäminen	21
4.1 Jarrutusenergian varastointitekniikat	21
4.2 Energian talteenotto linja-autoliikenteessä.....	26
4.3 Jarrutusenergian takaisinsyöttö verkkoon	28
5 MLNRV-raitiovaunun jarrutusenergian mittaukset	29
5.1 Mittausjärjestelyt.....	29
5.2 Mittaustulokset.....	32
6 Energiankulutus ja -säästömahdollisuudet	36
6.1 Energiankulutus	36
6.2 Energiansäästömahdollisuudet.....	40
6.3 Jarrutusenergian hyödyntämismahdollisuudet.....	41
7 Kannattavuuden arviointi	46
7.1 Nykyiset energiakustannukset	46
7.2 Taloudellinen kannattavuus	46
8 Yhteenveto	51
9 Lähdeluettelo	53

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

d	raitiovaunun kulkema matka
E_{jarrutus}	yhden jarrutuksen keskimääräinen energiamäärä (kWh)
E_{J1}	jarruvastuksen tuottama kokonaisenergia (kWh)
E_{J2}	jarruvastuksen tuottama energia (kWh/km)
E_{L1}	lisälämpövastuksen kuluttama kokonaisenergia (kWh)
E_{L2}	lisälämpövastuksen energiankulutus (kWh/km)
E_{P2}	säätöpellin läpi kulkenut energia
$E_{P,\text{max}}$	maksimi säätöpellin läpi saatava energia, kun pelti on kokonaan auki
E_{T2}	lämmitysenergian tarve
I_J	jarruvastuksen virta
n	investoinnin poistoaika
P_J	jarruvastuksen teho
P_L	lisälämpövastuksen teho
p_P	säätöpellin keskimääräinen aukioloasento prosentteina
r	korkokanta
R_J	jarruvastuksen resistanssi
t	mittausaika
t_L	lisälämpövastuksen päälläoloaika
vp	vaunupari
vp_{km}	vaunuparikilometri
x	investoinnista saatava hyöty vuodessa

Lyhenteet

HKL	Helsingin kaupungin liikennelaitos -liikelaite
HSL	Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymä
MLNRV	matalalattianivelraitiovaunu
MLNRV III	matalalattianivelraitiovaunu 3 (Artic)
MLRV	matalalattiaraitiovaunu (Variotram)
NiMH	nikkelimetallihybridi
NRV	nivelraitiovaunu

1 Johdanto

Kaupungit kehittyvät ja Helsinkiin sekä muualle pääkaupunkiseudulle muuttaa huomattavasti uutta väkeä vuosittain. Joukkoliikenteen tulee vastata tähän kehitykseen ja Helsingin strategisena valintana on panostaa raitioliikenteen kehittämiseen. [1]

Helsingin väkiluku on kasvanut viime vuosina nopeasti, ylittäen 600 000 asukkaan rajan jo elokuussa 2012, vaikka Helsingin yleiskaava 2002:ssa rajan ennustettiin rikkoutuvan vasta vuonna 2020. Helsingin uuden yleiskaavan luonnos julkaistiin 25.11.2014 ja se hyväksyttäneen vuonna 2016 kaupunginvaltuustossa ja -hallituksessa. Uusi yleiskaava perustuu skenaarioon, jossa Helsingin väkiluvun oletetaan kasvavan 860 000 asukkaaseen vuoteen 2050 mennessä. [1]

Väestönkasvu vaatii uusien asuinalueiden suunnittelua ja rakentamista ympäri kaupunkia. Sekä Helsingin uudessa yleiskaavassa että strategiaohjelmassa vuosille 2013–2016 painotetaan voimakkaasti myös kestävän liikkumisen edistämistä eli kävelyn, pyöräilyn ja joukkoliikenteen lisäämistä. Lisäksi uuden yleiskaavan keskeisimpänä teemana on raideliikenteeseen tukeutuvan joukkoliikenteen verkostokaupungin luominen. Tähän raideliikenneverkostoon kuuluisivat niin lähijunat kuin metrokin, mutta erityinen paino on raitioliikenteellä ja pikaraitiotieillä, joista jälkimmäisistä kaavaillaan liikennemuodoksi nykyiset moottoritiet korvaaville kaupunkibulevardeille sekä kaupungin poikittaisliikenteeksi. Linja-autoliikenne puolestaan täydentäisi raide-liikenteeseen perustuvia runkolinjoja. [1] [2]

Pikaraitiotiellä tarkoitetaan raidejärjestelmää, joka on nopeampi kuin tavallinen raitioliikenne, mutta sen vaunut ovat kevyempiä kuin metrojunat. Raitiovaunujen nopeus on nykyisessä verkostossa toisinaan noussut huolenaiheeksi. Liikennettä voidaan kuitenkin nopeuttaa parantamalla raideliikenteen etuuksia ja infrastruktuuria sekä pidentämällä pysäkkien välimatkoja. Lisäksi pikaraitiotiekaluston kapasiteetti tulee olemaan suurempi kuin nykyisten raitiovaunujen, vaikka raideleveys säilyy ennallaan. [3]

Uudessa yleiskaavassa säteittäisesti kantakaupungista poispäin suuntautuvien kaupunkibulevardien lisäksi pikaraitioiteita on suunniteltu myös kaupungin poikittaisliikenteeseen. Linja-autoilla nykyisin liikennöitävä, aikaisemmin Jokerina tunnettu, runkolinja 550 on muuttumassa pikaraitiotieksi noin vuonna 2020. Tämä Raide-Jokeriksi kutsuttu linja kulkee Helsingin Itäkeskuksesta Espoon Otaniemeen omalla väylällään ja pääosin runkolinjan 550 nykyistä reittiä pitkin. Lisäksi Tapiolan ja Viikin välille on kaavailtu aluksi linja-autoliikenteenä aloittavaa Tiedelinjaa, joka yhdistäisi useita korkeakoulukampuksia sekä merkittäviä työpaikka-alueita toisiinsa. Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnittelussa on varauduttu Tiedelinjan muuttamiseksi raide-liikenteeksi 2030 mennessä. [1] [4]

Raitiovaunuverkoston on siis tarkoitus laajentua merkittävästi vuoteen 2025 mennessä ja metrossa on tulossa vuonna 2016 liikennöinnin aloittava Länsimetro sekä myöhemmin sen jatke. Raidekilometrien lisääntyessä tarvitaan enemmän kalustoa, jotta saadaan ylläpidettyä riittävän tiheitä vuorovälejä kaikilla linjoilla. Kasvavan liikennöinnin myötä kokonaisenergiankulutus kasvaa ja tällöin puolestaan energiansäästöstä tulee yhä tärkeämpi kysymys. Tähän liittyen myös energiansäästö-

tapojen kuten jarrutusenergian talteenoton mahdollisuuksien uudelleenkartoitus on ajankohtaista. [5] [6]

Sähköautoista on jo joitain vuosia ennustettu ratkaisua öljyriippuvuuteen ja päästökysymyksiin. Suuri läpimurto on kuitenkin vielä toistaiseksi saavuttamatta eivätkä sähköautot poista henkilöautoilun perusongelmia, ruuhkautumista ja tilan tarvetta ydinkeskustassa. Täten nimenomaan joukkoliikenteen kehittäminen on tärkeää.

Tämän työn tarkoituksena on kartoittaa jarrutusenergian hyötykäytön käytännöt Helsingin kaupungin liikennelaitos -liikelaituksen (HKL) raitiovaunu- ja metrokalustossa nykyään sekä arvioida jarrutusenergian hyödyntämismahdollisuuksia kyseisessä kalustossa tulevaisuudessa. Työn yhteydessä on myös mitattu matalalattiaisen nivelraitiovaunun (MLNRV) jarrutusenergian nykyistä hyödyntämistä sekä arvioitu mahdollisten jarrutusenergian hyödyntämiseen liittyvien investointien kannattavuutta.

Jarrutusenergialla tarkoitetaan liikennevälineen jarruttaessa syntyvää energiaa, joka syntyy, kun raitiovaunun tai metron moottori toimii jarruttaessa generaattorina. Mekaanista jarrua käytetään vasta aivan jarrutuksen lopuksi. Jarrutuksessa syntynyttä energiaa on mahdollista käyttää hyödyksi ja siten on mahdollista säästää energiaa.

Tämän työn pohjalla on käytetty Elisa Vanhatalon vuonna 2012 HKL:lle tekemää diplomityötä [7] metron jarrutusenergian hyötykäyttömahdollisuuksista. Tämä diplomityö keskittyy siksi enemmän raitiovaunuliikenteen puolelle, mutta luo katsausta työn kaikissa osissa myös metrolienteeseen.

Työ tehtiin HKL:lle, joka vastaa Helsingin raitiovaunujen, metrojen ja lauttaliikenteen liikennöinnistä, sekä infrastruktuurin kehittämisestä ja kunnossapidosta. HKL koostuu neljästä yksiköstä: Infrapalvelut, Raitoliikenne, Metrolinen sekä Hallinto- ja talousyksikkö. Työ on tehty Infrapalveluiden kehittämistiimissä, jonka vastuulla on kehitys- ja selvityshankkeiden toteuttaminen.

Työn alussa, luvuissa kaksi ja kolme, on esitelty Helsingin raitio- ja metrolienteet tässä järjestyksessä. Luvuissa kuvataan nykyinen ja suunnitteilla oleva linjasto sekä esitellään kalusto ja sähkönsyöttöjärjestelmät. Luvuissa käydään läpi myös HKL:n kaluston nykyiset jarrutusenergian hyödyntämistavat. Luvussa neljä keskitytään jarrutusenergian talteenoton ja takaisinsyötön teknisiin vaihtoehtoihin ja toteutustapoihin sekä luodaan katsaus sähköisen autoliikenteen energian talteenoton ratkaisuihin ja tulevaisuuden näkymiin. Luku viisi käsittelee MLNRV I -tyypin vaunulle toteutetun jarrutusenergiamittauksen järjestelyitä, mittauksia sekä lopputuloksia. Luvussa kuusi tarkastellaan HKL:n metro- ja raitoliikenteen kaluston energiankulutusta, sen energiansäästämismahdollisuuksia sekä jarrutusenergian hyödyntämismahdollisuuksia. Luvussa seitsemän tehdään taloudellisia kannattavuustarkasteluja sekä energian säästön määrästä että mahdollisten investointien suuruudesta. Lopuksi esitetään yhteenveto.

2 Helsingin raitioliikenne

Helsingin raitioliikenteellä on pitkä historia. Ensimmäiset hevosvetoiset raitiovaunut nähtiin katukuvassa jo vuonna 1891 ja sähköraitiotieliikenne alkoi vuonna 1900. Liikenne olisi alun perin haluttu aloittaa sähkökäyttöisenä, mutta siihen ei saatu lupaa kaupungilta. Ensimmäinen sähköistetty raitiovaunulinja kulki Töölöstä Hietaniemeen ja vuotta myöhemmin sähköistettyjä linjoja oli neljä ja raiteita yhteensä 13 kilometriä. [8]

Alkujaan raitiovaunu oli parempituloisten kulkuväline lippujen kalliiden hintojen vuoksi, mutta toisen maailmansodan jälkeen lippujen hinnat laskivat inflaation takia ja raitiovaunusta tuli työväestön kulkuväline. Raitioliikenteen suosio oli huipussaan vuonna 1945, jolloin raitiovaunuilla kulki 150 miljoonaa matkustajaa. Henkilöautojen yleistyminen 1950-luvulla johti kuitenkin matkustajamäärien laskuun ja seuraavalla vuosikymmenellä jopa harkittiin raitioliikenteen lopettamista. [8]



Kuva 2.1 - Helsingin raitioliikennekartta 12.8.2013. [9]

Raitioliikenne kuitenkin palasi suosioon 1970-luvulla osittain öljykriisin ja osittain yksityisautoilun lisääntymisen aiheuttamien ruuhkien takia. Liikennemäärien lisääntyessä hankittiin myös uutta kalustoa ja ensimmäiset nivelvaunut saatiin liikenteeseen vuonna 1973. [8]

Suomessa raitiovaunut liikkuvat tällä hetkellä ainoastaan Helsingissä. Turussa on aikoinaan ollut raitiovaunuliikennettä ja Tampereelle suunnitellaan tällä hetkellä uutta raitiovaunuverkostoa. Helsingissä päälinjoja on yhdeksän ja raitiovaunun rataverkossa on nykyisin noin 48 km kaksisuuntaista linjarataa. Lisäksi yksisuuntaisia varikkoalueiden ratoja sekä järjestelyraiteita on liki 20 km. Kuvassa 2.1 on esitetty Helsingin raitiovaunuliikenteen kartta. [9]

Raitiovaunuverkoston on tarkoitus laajentua merkittävästi vuoteen 2027 mennessä HKL:n raitioliikenteen nykyisen pitkän tähtäimen suunnitelman mukaan. Raitiolinjaston keskeisimpiä laajentumiskohteita ovat Jätkäsaari, Kruunuvuorenranta, Pasila ja Kalasatama. Raideliikenteen suunnittelu alueilla etenee samanaikaisesti maankäytön suunnittelun kanssa. Kokonaan uudet asuinalueet, kuten esimerkiksi Jätkäsaari, voidaan suunnitella jo alusta alkaen siten, että alueen joukkoliikenne perustuu raitioliikenteeseen. Suurin yksittäinen raitioliikennehanke edellä mainituista lienee Kruunuvuorenranta, sillä reitin olisi määrä kulkea kantakaupunkiin Kruunusiltojen (Kruununhaka - Kalasatama - Korkeasaari - Palosaari - Kruunuvuorenranta) kautta. [2] [10]

Raidekilometrien ja kaluston määrän lisääntyessä energiansäästöstä tulee yhä tärkeämpi kysymys. Tähän liittyen myös jarrutusenergian talteenoton mahdollisuuksien kartoitus on ajankohtaista. Raitiovaunujen nykyisiä jarrutusenergian talteenotto- ja hyödyntämistapoja on kuvattu luvussa 2.3. Energiankulutusta ja -säästömahdollisuuksia puolestaan käsitellään tarkemmin luvussa 6.1.1.

HKL:llä on kolme raitioliikenteen varikkoa: Koskela, Töölö ja Vallila. Koskelan varikko on näistä kolmesta suurin ja sitä laajennetaan lähivuosina. Koskelassa säilytetään ja huolletaan kaksi kolmannesta raitiovaunuista, Töölössä loput. Koskelan varikolla toimivat myös rata- ja ratasähkökorjaamot. Vallilan varikolla puolestaan toimii raitiovaunukorjaamo ja ratojen kunnossapito. [5]

Raitiovaunuliikenteen matkustajamäärä oli 56,7 milj. vuonna 2013. Tämä on 16 % kaikista HSL:n seudulla tehdyistä joukkoliikennematkoista ja 22 % kaikista Helsingin sisällä tehdyistä matkoista. Helsingin sisäisiin matkoihin lasketaan metro-, raitiovaunu-, bussi-, juna- sekä Suomenlinnan lauttaliikenne. [11]

2.1 Raitiovaunukalusto

Normaalin matkustajaliikenteen raitiovaunuja on Helsingissä yhteensä 124 kappaletta ja niitä on kolmea mallia: Nivelraitiovaunuja (NRV), Variotram-vaunuja sekä uusia Artic-vaunuja. Nivelraitiovaunut ovat nykyisin käytössä olevista vaunuista vanhimpia ja ne on valmistettu vuosina 1973–1987. Nivelraitiovaunuista 52 kappaletta on osamatalalattiaisia (MLNRV), joka tarkoittaa, että raitiovaunuun on lisätty matalalattiainen välipala. Ilman matalalattiaista välipalaa on 30 vaunua. 2000-luvun taitteessa valmistettuja Variotram-vaunuja on yhteensä 40 kappaletta ja ne ovat kaikki

matalalattiaisia, kuten myös uudet Artic-vaunut, joita on tällä hetkellä kaksi kappaletta, mutta joita on tulossa vuosina 2015–2018 vielä 38 kappaletta lisää. Taulukossa 1 on esitetty vuoden 2015 tammikuussa käytössä olevien raitiovaunujen tietoja. [9]

Uutta kalustoa, Artic-vaunuja, on jo päätetty hankkia yhteensä 40 kappaletta korvaamaan poistuvia vanhimpia nivelvaunuja. Lisäksi reittilaajennusten toteutuessa suunnitellusti tarvitaan vuoteen 2025 mennessä myös noin 30 lisävaunua. Uusien vaunujen tilauksessa on olemassa lisäoptio 30 lisävaunun tilaamiselle. Tällöin vaunuja olisi yhteensä 162 kappaletta vuonna 2025. [10]

Taulukko 1 - Raitiovaunutyyppien perustietoja. [9]

Tyyppi	Artic	Variotram	MLNRV II	MLNRV I	NRV
Vaununumerot	401–402	201–240	71–112	113–122	31–70
Lukumäärä	2	40	42	10	30
Valmistettu	2013	1998–2004	1983–1987	1973–1975	1973–1975
Valmistaja	Transtech	Bombardier	Strömberg	Strömberg	Strömberg
Moottorit	8x65 kW	12x45 kW	2x130 kW	2x130 kW	2x130 kW
Kokonaisteho	520 kW	540 kW	260 kW	260 kW	260 kW

Kuvassa 2.2 on esitetty kuvat nykyisin käytössä olevista raitiovaunutyypeistä. NRV:t ovat muuten täysin samanlaisia MLNRV-vaunujen kanssa, mutta niissä ei ole MLNRV:hen lisättyä matalalattiaista välipalaa. Raitiovaunutyytit poikkeavat toisistaan myös tekniikan suhteen. Työn kannalta tärkein tekninen osuus on jarrutusenergiaan liittyvät järjestelmät vaunuissa. Tätä käsitellään luvussa 2.3. Tässä luvussa kerrotaan kaluston muusta tekniikasta.



a) NRV



b) Variotram



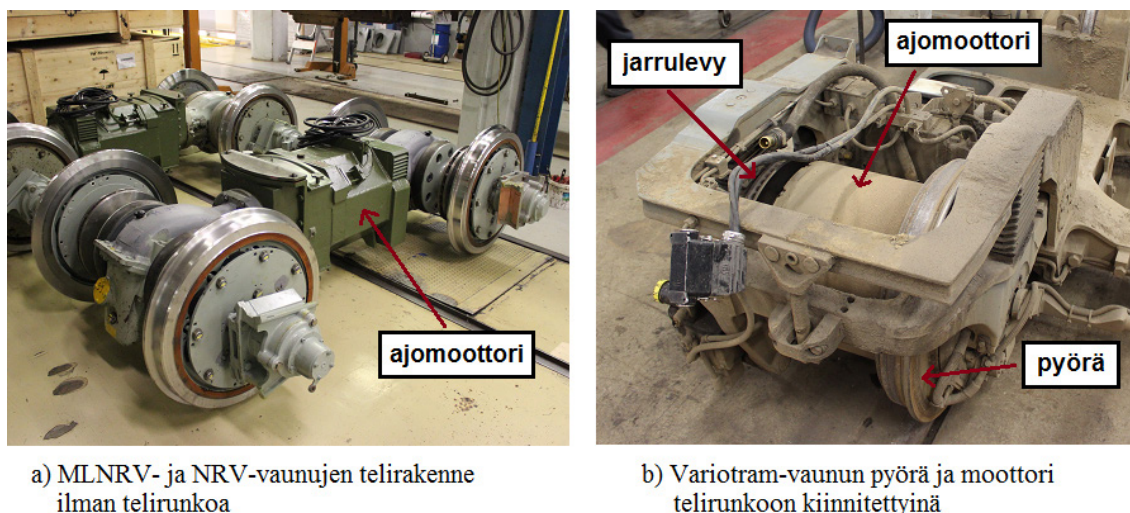
c) MLNRV



d) Artic

Kuva 2.2 - Helsingissä käytössä olevia raitiovaunutyyppijä.

MLNRV- ja NRV-vaunuissa on päädyissä vetävät telit ja keskellä juoksutelit, joita on MLNRV-vaunuissa kaksi kappaletta ja NRV-vaunuissa yksi. MLNRV-vaunun juoksuteleissa on jarrulevyt, sillä vaunutyyppiin lisätyn välipalaosan tuoman lisämassan myötä tarvitaan lisätehoa jarrutukseen. Vaunutyyppit ovat muuten tekniikaltaan samoja ja vetävissä teleissa on aina yksi ajomoottori teliä kohden. Kyseisten vaunujen telirakenne on esitetty kuvassa 2.3a.



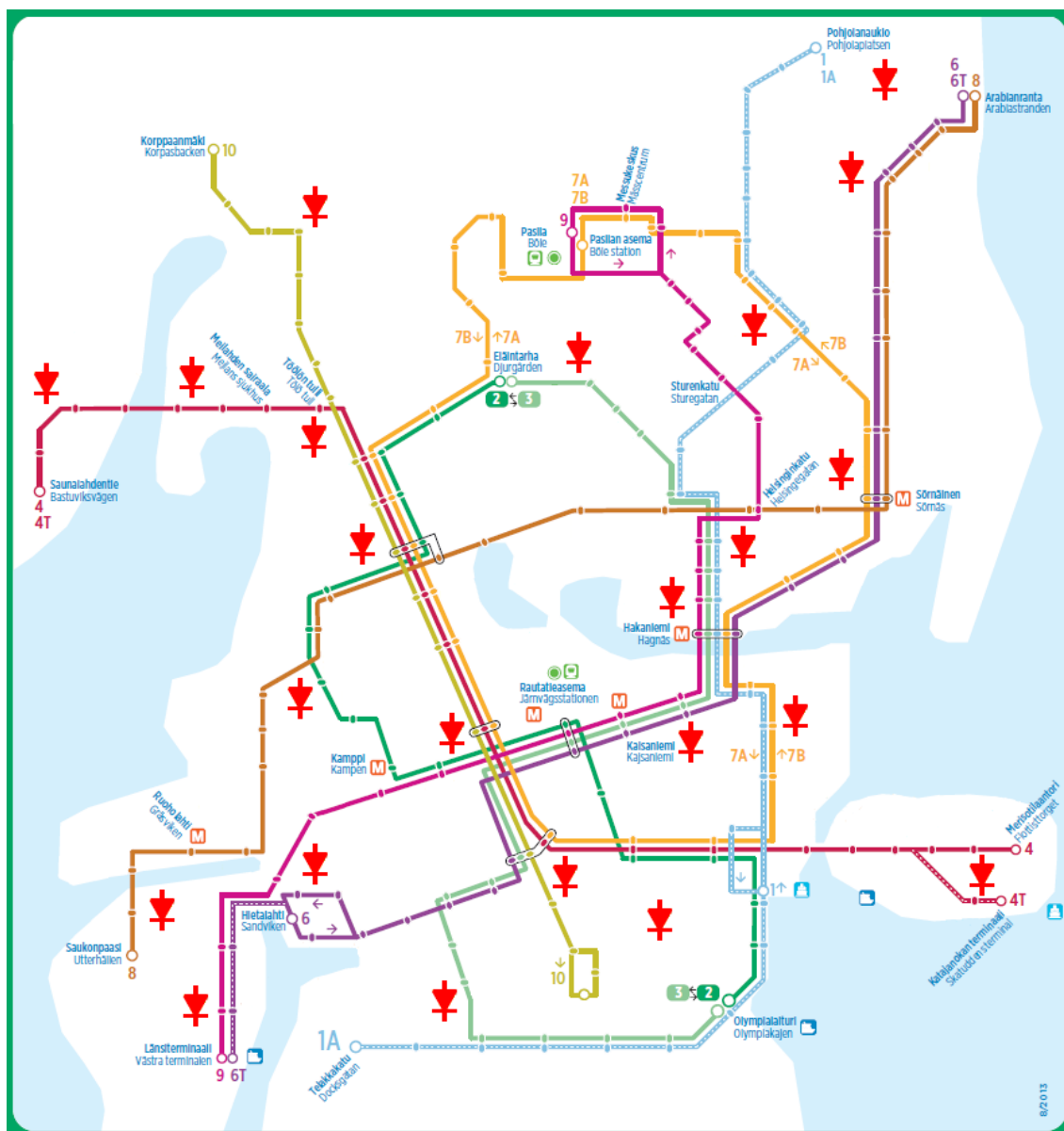
Kuva 2.3 - Eri raitiovaunujen teliratkaisuja.

Variotram-vaunuissa kaikki kolme teliä ovat vetäviä ja niissä jokaisella pyörällä on oma moottori. Jokaisessa telissä on siis neljä moottoria. Päätyteleissa kahdella moottorilla on jarrulevy ja keskitelissä kaikilla neljällä. Variotram-vaunun teli on esitetty kuvassa 2.3b. Artic-vaunuissa telejä on neljä ja ne kaikki ovat vetäviä. Moottorit ovat akselikohtaisia eli jokaisessa telissä on kaksi moottoria.

Raitiovaunuissa on kolme eri jarrujärjestelmää: sähköjarru, mekaaninen jarru sekä kiskojaru. Sähködynaamista jarrua käytetään vaunun hidastamiseen ja se jarruttaa vaunun lähes pysähdyksiin asti. Juuri ennen pysähdystä mekaaninen jarru kiinnittyy ja korvaa sähköjarrun. Sähköjarrua käytettäessä vaunun ajomoottorit toimivat generaattoreina ja syntyvä jarrutusenergia syötetään jarruvastuksille tai takaisin ajolankaan vaunutyyppistä riippuen. Vaunun mekaanisina jarruina ovat sähköhydraulisesti toimivat jousijarrut, jotka vaikuttavat jarrulevyihin. Mekaanista jarrua käytetään siis pysäyttämään vaunu pienestä nopeudesta, mutta se toimii myös sähköjarrun varajärjestelmänä. Jokainen teli on myös varustettu kahdella sähkömagneettisella kiskojarulla, jotka toimivat lisäjarruina hätätilanteissa. Kun kiskojaruun kytketään jännite, muodostuu magneettikenttä, jolloin sähkömagneetti vetää itsensä kiinni kiskoon. [12]

2.2 Sähkönsyöttöjärjestelmä

Raitiotiejärjestelmässä on tällä hetkellä 23 sähkönsyöttöasemaa. Sähkö saadaan Helen Sähköverkko Oy:n 10 kV:n (keskusta-alue) tai 20 kV:n (esikaupunkialue) keskijänniteverkosta ja muunnetaan syöttöasemilla 600 V:n tasajännitteeksi. Asemia on usean

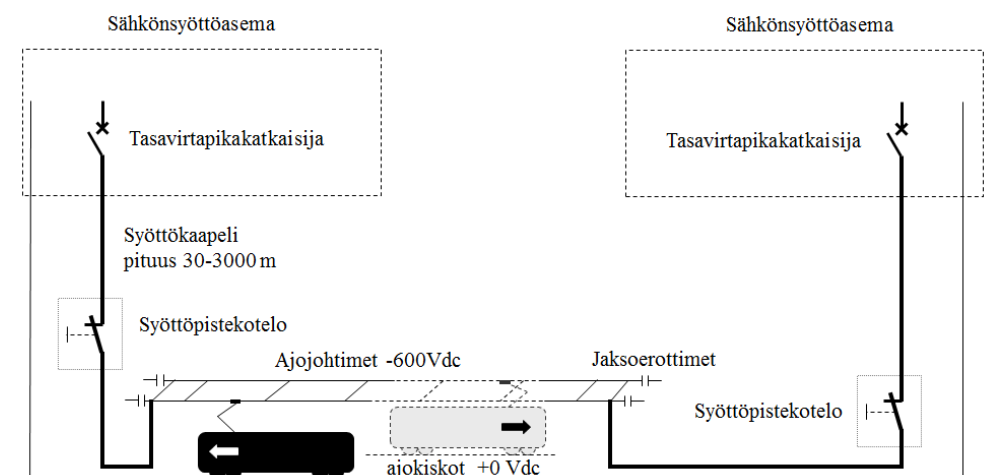


Kuva 2.4 - Suuntaa-antava kuva HKL:n raitioliikenteen sähkönsyöttöasemien sijainnista. [12]

Raitiovaunuliikenteen syöttöverkko on tikapuuverkoksi kytketty ilmajohtoverkko, jossa vierekkäin kulkevien raitiovaunujen avojohdot on yhdistetty toisiinsa johdolla aina noin sadan metrin välein. Raitiovaunu ottaa virran ajojohtimesta vaunun katolla olevalla virroittimella. Helsingin raitiovaunujärjestelmässä käytetään tasavirtaa, jonka miinuspuoli on kytketty ajojohtimeen. [13]

Ajojohtimen nimellinen jännite on 600 V, joka juontaa juurensa historiasta ja pitkältä kehittyneestä rataverkostosta. Kuitenkin maailmalla monet raitiovaunut kulkevat 750 V:n jännitteellä ja Suomessakin mahdollisesti siirrytään tähän jännitetasoon tulevaisuudessa. Korkeamman jännitteen etuna olisi muun muassa siirtohäviöiden pieneneminen ja siten ensisijaisesti syöttöenergian siirron, mutta myös jarrutusenergian takaisinsyötön hyötysuhteen paraneminen. Nykyisin jännitteen noston estävät tiettyjen sähkönsyöttöasemien vanhat komponentit sekä nivelraitiovaunujen vanhempi tekniikka. Jännitteen nostoa tullaan harkitsemaan vanhojen nivelraitiovaunujen poistuessa käytöstä. Kappaleessa 6.2 käsitellään tarkemmin jännitteen noston etuja sekä muita energiansäästön mahdollisuuksia. [13]

Syöttöverkko on jaettu syöttöjaksoihin jaksoerottimilla. Syöttöjaksoja on linjaverkossa yli 70 kappaletta, joista joillain on kaksisuuntainen sähkönsyöttö asemilta, jollain vain syöttö yhdestä suunnasta. Kaksisuuntainen sähkönsyöttö takaa tasaisemman jännitteen syöttöjaksolle sekä syöttöjakson toiminnan vaikka toinen syöttöasemista ei olisi toiminnassa. Yleisesti vilkkaimmin liikennöidyille linjaosuuksille on järjestetty kaksisuuntainen syöttö, joka on esitetty kuvassa 2.5. [13]

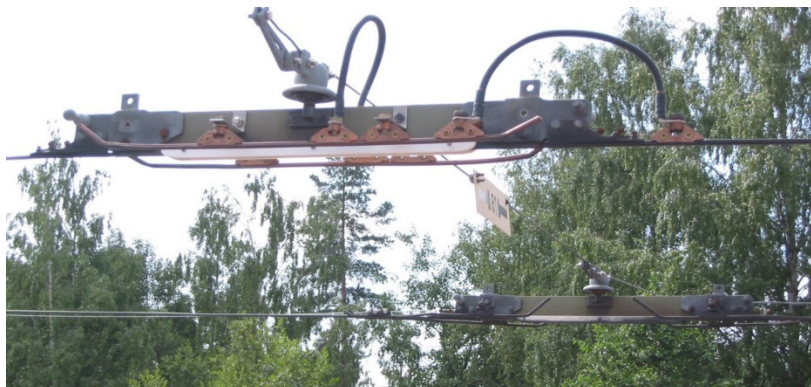


Kuva 2.5 – Raitioliikenteen kaksipuoleinen syöttöperiaate, jossa kaksi eri sähkönsyöttöasemaa syöttää samaa syöttöjaksoa. [14]

Jaksoerotin on laite, jonka tehtävänä on jakaa syöttöverkko syöttöjaksoihin ja siten erottaa nämä jaksot toisistaan sähköisesti. Näin esimerkiksi yksittäinen jakso voidaan poistaa käytöstä tarvittaessa, poiston vaikuttamatta kuitenkaan koko verkkoon. HKL:n järjestelmässä jaksoerottimet toimivat syöttöverkossa yhtä aikaa sekä eristiminä että erottimina, kun taas rautateillä melkein vastaavia laitteita kutsutaan ryhmityseristimiksi ja ne ainoastaan eristävät, eivät erota syöttöjaksoja. HKL:llä on tällä hetkellä käytössä sekä katkettomia eli yhdistäviä että katkollisia jaksoerottimia. Nämä tyypit on esitetty kuvassa 2.6. Osa erottimista on oikosuljettu, jolloin oikosuljetut syöttöjaksot muodostavat yhteisen syöttöjaksoalueen. [14]

Nykyisillä erottimilla virroitin kokee jännitteettömiä kohtia erottimien kohdalla ja näiden kohtien rajapinnoilla olevat vähintään 600 V:n jännite-erot aiheuttavat kipinäintiä raitiovaunun ajaessa tästä. Jatkossa erottimien rakennetta saatetaan muuttaa lisäämällä niihin ”viikset”, joiden avulla saadaan säilytettyä galvaaninen erotus syöttöjaksoissa,

mutta vältetään jännitteettömiltä pätkiltä linjassa. Tällaisia erottimia on jo käytössä muutamia Koskelan varikolla ja ne ovat osoittautuneet toimiviksi. [15]



Kuva 2.6 – HKL:llä käytössä olevia jaksoerottimia. Ylempänä katkoton erotin ja alempana katkollinen erotin. [14]

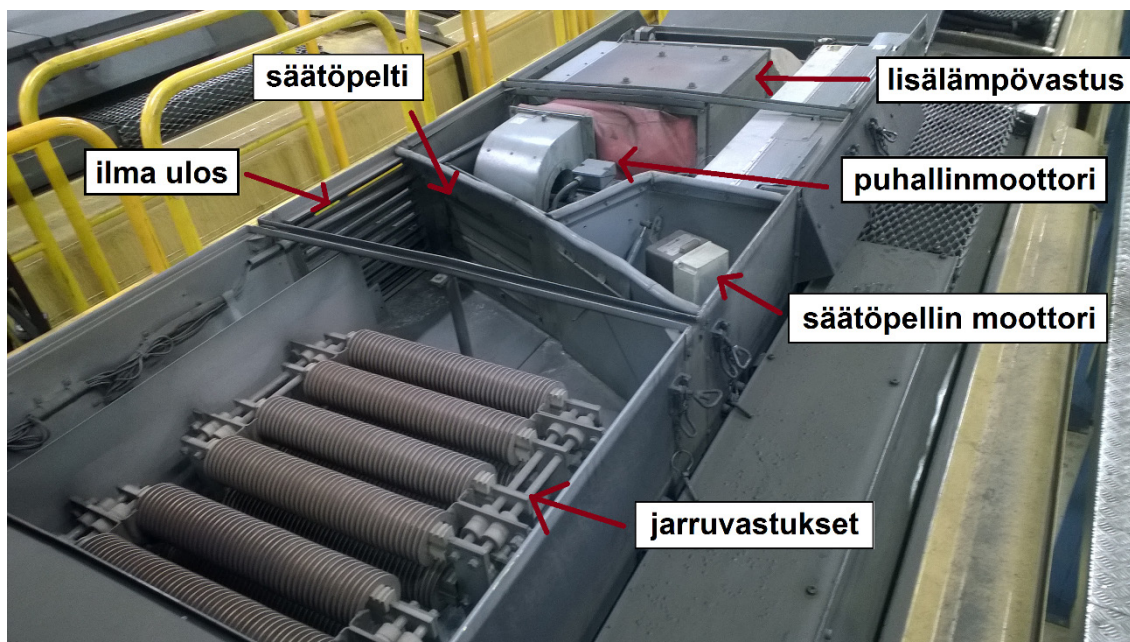
2.3 Jarrutusenergian hyödyntäminen tällä hetkellä

Tässä kappaleessa kuvataan kuinka jarrutusenergiaa hyödynnetään HKL:n raitiovaunukalustossa tällä hetkellä eli kuvattuina ovat ainoastaan nykyiset sovellukset ja ratkaisut. Jarrutusenergian erilaisia hyödyntämismahdollisuuksia tulevaisuudessa on kuvattu kappaleessa 6.3.1. Luvussa ei myöskään oteta kantaa menetelmien toimivuuteen tai implementoinnin perusteluihin vaan näitä käsitellään niin ikään kappaleessa 6.3.1.

Vanhimmissa käytössä olevissa vaunuissa eli nivelraitiovaunuissa (NRV ja MLNRV) jarrutusenergia ohjataan katolla sijaitseviin jarruvastuksiin, jotka sitovat energiaa raitiovaunun jarruttaessa ja vapauttavat sitä matkustamon lämmitykseen tarvittaessa. MLNRV I -sarjan vaunuissa molempien moottoreiden jarruvastusjärjestelmät sijaitsevat A-vaunussa, joka on raitiovaunun ensimmäinen vaunu. Viimeistä vaunua, eli B-vaunua, sekä myöhemmin lisättyä välipalavaunua C lämmittävät lisälämpövastukset, jotka saavat energiansa suoraan linjasyötöstä. Uudemmissa MLNRV II -sarjan vaunuissa puolestaan sekä A- että B-vaunuissa on jarruvastusjärjestelmä ja C-vaunua lämmittää ainoastaan lisälämpövastus. Mikäli matkustamo ei tarvitse lämmittää, puhalletaan lämmin ilma ulos. Jarrutusenergian takaisinsyöttö ajojohtoon on estetty diodein, jotta pystytään linjaoikosulun sattuessa varmasti estämään virran siirtyminen ajojohtoon esimerkiksi ajojohdon katketessa.

Kuvassa 2.7 on esitetty MLNRV II -tyyppisen vaunun jarruvastussysteemi. Säätepellin moottori saa termostaatilta tiedon matkustamon lämmitystarpeesta ja ohjaa säätöpeltiä sen mukaisesti. Kuvan mukaisessa systeemissä säätöpelti toimii pienellä viiveellä ja liikkuu hitaasti. Näin vältetään säätöpellin jatkuva nopea räpsyminen auki ja kiinni. Mikäli matkustamo ei saada lämmitettyä tarpeeksi jarruvastusten energialla, käytetään lisälämpövastuksia, jotka saavat energiansa suoraan linjasyötöstä. Matkustamoon menevää lämmintä ilmaa kontrolloidaan säätöpellillä, mutta ulos menevän ilman ritilä on kiinteä ja liikkumaton. Näin ollen jonkin verran lämmintä ilmaa

menee aina hukkaan vaikka säätöpelti olisikin täysin auki. Ulkoilmaritilän olisi tehokasta olla päin vastaisessa säädössä säätöpellin kanssa eli säätöpellin ollessa täysin auki, olisi ulkoilmaritilä kiinni ja päinvastoin. Tätä ei kuitenkaan ole toteutettu turvallisuussyistä, sillä kiinteä ulkoilmaritilän toiminta ei voi vikaantua kuten liikkuvan ja siten jarruvastustila ei pääse niin helposti ylikuumenemaan ja aiheuttamaan vaaratilanteita.

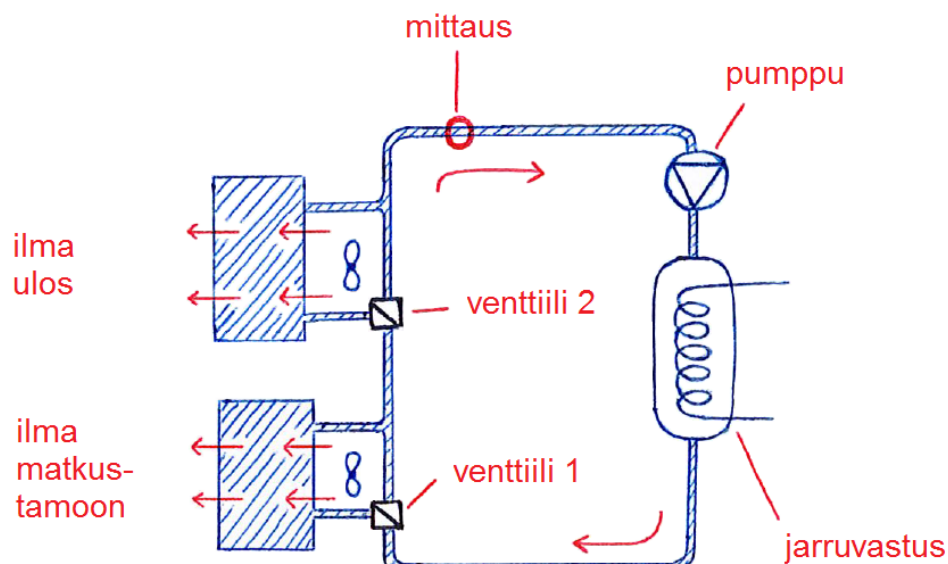


Kuva 2.7 - MLNRV II vaunun nro 73 jarruvastusjärjestelmä. Säätöpellin avulla säädelään jarruvastuksilla tuotetun lämmön siirtymistä matkustamoon.

Vanhemmissa kokomatalalattiaisissa Variotram-vaunuissa jarrutusenergia syötetään takaisin ajolankaverkkoon kokonaisuudessaan, mikäli samalla syöttöjaksolla on toinen vaunu kiihdyttämässä samaan aikaan eli toisin sanoen vastaanottamassa kyseisen energian. Vaunun kiihdyttäessä ajolangan syöttöjännite kyseisellä jaksolla laskee, jolloin jarrutusenergiaa voidaan syöttää jarruttavasta vaunusta syöttöverkkoon. Mikäli samalla jaksolla ei ole toista vaunua kiihdyttämässä, jarrutusenergiaa käytetään vaunun apukäyttöihin ja ylimääräinen energia ohjataan vastuksiin ja puhalletaan ulos, eikä suurinta osaa energiasta näin ollen käytetä laisinkaan hyödyksi. Vaunun lämmitysenergia puolestaan otetaan suoraan linjasyötöstä. [16]

Uudemmassa matalalattiaisissa Artic-vaunuissa jarrutusenergia syötetään vesivaraajaan, joka hyödyntää energiaa matkustamon lämmitykseen kuvan 2.8 periaatteen mukaisesti. Järjestelmässä käytetään veden sijasta vedenkaltaista nestettä, jota tässä työssä kutsutaan vedeksi yksinkertaisuuden vuoksi. Jarrukatkoja säätelee piiriin kulkeutuvaa virtaa, joka lämmittää jarruvastusta, joka puolestaan lämmittää vettä. Jarrukatkoja sulkeutuu aina jarruttaessa, mutta myös mikäli jarrutusenergiasta ei saada tarvittavasti jarrutusenergiaa matkustamon lämmittämiseen. Tällöin jarrukatkoja käyttää toiminnassaan linjasyötön energiaa. Jarrutusenergiaa ohjataan myös takaisin ajojohtoon, mikäli samalla syöttöjaksolla on samaan aikaan toinen raitiovaunu kiihdyttämässä eli ottamassa energiaa vastaan. [16]

Kuvassa 2.8 venttiilit 1 ja 2 säätelevät veden kulkusuuntaa järjestelmässä. Venttiilin 1 ollessa auki vesi kiertää säiliön kautta, jossa se lämmittää ilmaa ja lämmennyt ilma puhalletaan vaunun matkustamoon. Mikäli matkustamolla ei ole lämmitystarvetta, pysyy venttiili kiinni ja vesi ohjautuu ohi säiliön. Venttiili 2 toimii vastaavalla tavalla, mutta se saa aukaisukäskyn veden lämpötilan mittaustiedosta eli mikäli lämpötila vesivaraajassa nousee asetettua arvoa korkeammaksi, ohjataan ylimääräistä lämpöä ulos. [16]



Kuva 2.8 - Periaatekuva Artic-vaunutyyppin jarrutusenergian varastointitavasta. Jarrutusenergia varastoituu lämpönä vesivaraajaan, josta sitä tarvittaessa käytetään matkustamon lämmitykseen.

Alla olevaan taulukoon 2 on koottu eri raitiovaunutyyppien jarrutusenergian hyödyntäminen tällä hetkellä. NRV-, MLNRV- ja Artic-vaunut käyttävät jarrutusenergiaa vaunujen matkustajatilojen lämmittämiseen. Lisäksi Variotram- ja Artic-vaunut voivat sopivassa tilanteessa syöttää jarrutusenergiaa takaisin ajojohtoon.

Taulukko 2 - Raitiovaunutyyppien jarrutusenergian hyödyntäminen.

Vaunutyyppi	NRV / MLNRV	Variotram	Artic
Lämmitys	kyllä, ilmajäähdytteisillä jarruvastuksilla	ei, lämmitysenergia suoraan linjasyötöstä	kyllä, vesijäähdytteisillä jarruvastuksilla
Takaisinsyöttö	ei käytössä	kyllä	kyllä

3 Helsingin seudun metrolinjat

Helsingin metron suunnittelun lasketaan alkaneen vuonna 1955. Kaupungin väkiluvun arvioitiin kasvavan nopeasti ja joukkoliikennettä haluttiin siirtää maan alle, jotta katuverkoston kapasiteetti riittäisi kasvavalle väestömäärälle. Varsinainen päätös metroverkon rakentamisesta tehtiin kuitenkin vasta vuonna 1969. Kaksi vuotta myöhemmin avautui koerata Vartiokylän ja Siilitien välille. [17]

Matkustajaliikenne alkoi vuonna 1982 Hakaniemen ja Itäkeskuksen välillä ja myöhemmin samana vuonna avattiin myös Rautatieasema liikenteelle. 80-luvulla avattiin lisäksi Kampin, Sörnäisten, Myllypuron, Kontulan ja Mellunmäen asemat tässä järjestyksessä. Vuonna 1993 metroverkko laajeni lännessä Ruoholahteen, joka on nykyisen metrolinjan lännenpuoleinen pääasema. Kaksi vuotta myöhemmin avattiin Kaisaniemen asema, jonka nimi muuttui vuonna 2015 Helsingin yliopistoksi. Vuosaaren haara otettiin käyttöön vuonna 1998 ja siihen kuuluvat Puotilan, Rastilan ja Vuosaaren asemat. Uusin asema on Kalasatama, joka avattiin vuonna 2007. [17]

Helsingin Metrossa on tällä hetkellä yksi idässä kahtia jakautuva linja, joka kulkee kokonaisuudessa Helsingissä. Lännessä lähtöpisteenä on Ruoholahti, idässä reitti jakautuu Itäkeskuksen jälkeen Vuosaareen ja Mellunmäkeen. Radan kokonaispituus on 21,1 km, josta kolmasosa kulkee tunnelissa. Rata nousee maan päälle Sörnäisten jälkeen itään mentäessä. Nykyisessä metrojärjestelmässä on 17 asemaa ja sen kartta on esitetty kuvassa 3.1. [9]



Kuva 3.1 - Helsingin metrolinjoja. Tumman oranssilla katkoviivalla merkityt ovat tunneliosuuksia. [18]

Nyt käytössä olevan metroradan jatkeeksi on rakenteilla Länsimetro, jonka ensimmäisen osan on määrä valmistua vuoden 2015 lopussa ja avautua liikenteelle syksyllä 2016. Metroa laajennetaan Ruoholahdesta Espoon Matinkylään saakka. Uusia asemia tulee 8 kappaletta, joista kaksi on Helsingin puolella ja kuusi Espoossa. Länsimetron ensimmäisen osan pituus tulee olemaan 13,9 km. [6]

Espoon kaupunginvaltuusto päätti syksyllä 2014 Länsimetron jatkeen rahoituksen hyväksymisestä ja näin ollen metrolinja jatkuu Matinkylästä vielä Kivenlahteen asti. Tällä Länsimetron toiselle osalle rakennetaan viisi uutta asemaa 7 km:n matkalle ja reitin on määrä valmistua aikaisintaan vuonna 2020. Kuvassa 3.2 on esitetty Länsimetron kartta kokonaisuudessaan. [6]



Kuva 3.2 - Länsimetron reitti kokonaisuudessaan. [6]

Metrolle on suunniteltu myös itäjatketta, Östersundomin metroa, joka kulkisi Mellunmäestä Sipoon Majvikiin. Östersundomin yleiskaavaehdotus perustuu tehokkaaseen joukkoliikenteeseen, metron jatkamiseen idässä. [19]

Kuten raitiovaunujen yhteydessä luvussa 2 mainittiin, Helsingin uusi yleiskaava painottaa joukkoliikennettä, nimenomaan raideliikennettä, johon myös metro lukeutuu. Metro on suosittu kulkuväline Helsingissä ja sillä kulkee vuosittain noin 63,5 miljoonaa matkustajaa. Tämä on 19 % kaikesta HSL:n alueen matkoista ja 25 % Helsingin sisäisistä matkoista. [11]

Metron automaatioprojekti on ollut näkyvässä osassa Länsimetron toteutuksessa. Metroa suunniteltiin automaattiseksi alun perin jo 60-luvulla ja 70-luvulla automaattimetrollakin tehtiin ajotestejä koeradalla. Tuolloisesta automaatiohankkeesta kuitenkin luovuttiin suunnitelmista ja testeistä huolimatta, sillä haluttua luotettavuustasoa toiminnalle ei saavutettu. Näin ollen matkustajaliikenne aloitettiin ilman automaatioajoa. [20]

Uudempi automaatiometrosuunnittelu heräsi 2000-luvun alussa, kun metron ohjausjärjestelmän todettiin tarvitsevan uusimista lähitulevaisuudessa. Täysautomaattinen liikennejärjestelmä päätettiin tilata Siemensiltä vuonna 2008. Projekti on kuitenkin viivästynyt huomattavasti. Syksyllä 2014 alkuperäisestä aikataulusta oltiin jäljessä neljä vuotta, johtuen muun muassa vanhempien M100- ja M200-vaunujen

automatisoinnin hankaluuksista sekä HKL:n ja Siemensin välisistä projektin kustannuskiistoista. Vanhojen vaunujen automatisointia ei ole aiemmin tehty missään muualla maailmassa. Viivästymisiin ja sopimusrikkomuksiin vedoten HKL:n johtokunta päätti kokouksessaan 18.12.2014 purkaa Siemensin kanssa tehdyt sopimukset ja näin ollen Länsimetro aloittaa liikennöinnin manuaalisena valmistuttuaan näillä näkymin vuonna 2016. [21]

Automaattimetron toteutus on kuitenkin vielä mahdollinen 2020-luvulla, jolloin vanhimmat metrojunat poistuvat käytöstä ja ne korvataan uusilla. Automatisoinnin tulisi tällöin olla oleellisesti helpompi tehtävä, kun junat ovat tekniikaltaan uusia ja samanlaisia toistensa kanssa. Lisäksi automaattimetroon liittyvien laituriovien asennus helpottuisi, kun junien ovet sijaitsevat samoilla kohdin. [21]

Automaattimetroa on perusteltu lyhentyvillä vuoroväleillä ja sitä myöten suurentuvalla liikennöintikapasiteetilla. Automatisoinnilla voitaisiin kuitenkin myös saavuttaa energiasäästöä sekä optimoida liikennettä. Tätä aihetta tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 6.2.

Länsimetron asemat on mitoitettu ainoastaan kahden vaunuparin junille, kun taas nykyisessä metrojärjestelmässä asemien mitoitus on tehty ruuhka-aikoina liikennöiville kolmen vaunuparin junille. Länsimetron lyhyitä asemia perusteltiin automaattimetrolla ja sen tiheämmillä liikennöintiväleillä. Tällöin lyhyillä asemilla säästetään rakennuskustannuksissa ja tiheä liikennöintiväli takaisi kuitenkin riittävän kapasiteetin myös kahden vaunuparin junilla liikennöitäessä. Myös uudet M300-sarjan junat on tilattu kahden vaunuparin mittaisina, koko junan läpikäveltävänä yksikkönä.

Länsimetron tullessa käyttöön liikennöinti hoidetaan kahden vaunuparin junilla ja vuoroväliä tihennetään. Linjoja tulee kaksi: Matinkylä-Vuosaari ja Tapiola-Mellunmäki. Tämä tarkoittaa, että ruuhka-aikana välillä Tapiola-Itäkeskus metron liikennöintiväli on 2,5 minuuttia nykyisen neljän minuutin sijaan. Ruuhka-aikojen ulkopuolella metrot liikennöivät tällä osuudella nykyisen käytännön mukaisesti viiden minuutin välein. Tällä hetkellä metro liikennöi ruuhka-aikana neljän minuutin välein, muuten viiden minuutin välein välillä Ruoholahti-Itäkeskus. [6]

3.1 Metrokalusto

Helsingin metroa liikennöidään M100- ja M200-sarjan junilla ja Länsimetroa varten ollaan hankkimassa uutta M300-sarjaa. Metron liikennöintiyksiköt lasketaan vaunupareissa, joita on tällä hetkellä käytössä 54 kappaletta: 42 on vanhempaa M100-mallia ja 12 uudempaa M200-mallia. Länsimetroa varten on tulossa 20 juna M300-mallia. Jokainen M300-juna on kahden nykyisen vaunuparin pituinen. [9]

Kuvassa 3.3 on esitetty kaikki kolme metrotyyppiä. Junatyypit ovat ulkonäöltään, päämitoiltaan ja suoritusarvoiltaan melko samanlaisia ja näkyvin ero matkustajalle on junien läpikäveltävyydessä. M100-junassa vaunuista ei voi kävellä toiseen edes vaunuparin sisällä, mutta M200-junassa tämä on mahdollista. M300-junat puolestaan ovat kahden vaunuparin mittaisia, kokonaan läpikäveltäviä kokonaisuuksia. M300-junat on myös suunniteltu automaattimetroiksi eli niihin tulevat ohjaamot on suunniteltu

väliaikaisiksi. Ohjaamot ovat toistaiseksi pysyviä, mutta mikäli junat automatisoidaan tulevaisuudessa, voidaan ohjaamot purkaa pois.



Kuva 3.3 - Metrojunat vasemmalta oikealle: M100, M200 ja luonnoskuva M300:sta. [9]

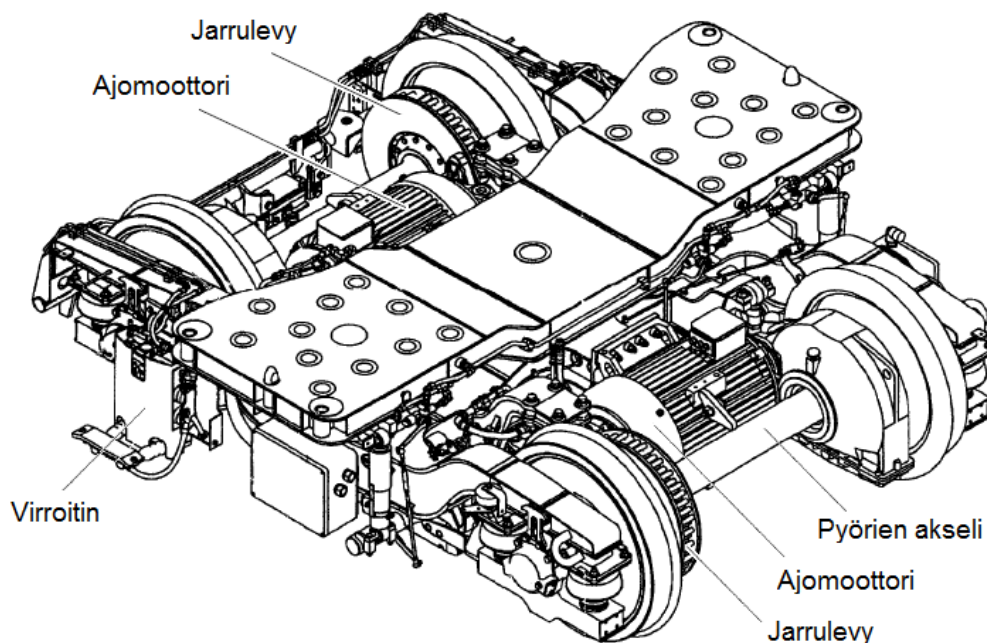
M100- ja M200- sarjan junien pienin toiminnallinen yksikkö on yksi vaunupari eli kaksi vaunua. M100-sarjassa vaunuparin vaunut ovat kiinni toisissaan välilytkimen välityksellä, M200-sarjan vaunupari on yksi kiinteä yksikkö. M300-sarjan junat ovat itsessään valmiita toiminnallisia yksiköjä. Yksi juna on kahden vaunuparin mittainen, eikä kahta junaa voida kytkeä yhteen liikennöintiin. Vaunujen perustietoja on esitetty taulukossa 3. Taulukkoa luettaessa tulee muistaa, että arvot on annettu kunkin vaunutyyppin pienimmän mahdollisimman toiminnallisen yksikön mukaan eli M100- ja M200-tyypeille vaunupareissa ja M300-tyypeille junissa. M300:n arvot on esitetty vertailukelpoisuuden vuoksi myös vaunupariarvoina, vaikka kyseinen vaunutyyppi ei pystykään yhdellä vaunuparilla liikennöimään.

Taulukko 3 - Metrovaunutyyppien perustietoja. [9]

Tyyppi	M100	M200	M300
Vaununumerot	101–184	201–224	301–
Lukumäärä	42 vaunuparia	12 vaunuparia	20 junaa (40 vaunuparia)
Valmistettu	1977–1984	2000–2001	2014–
Valmistaja	Strömberg	Bombardier	CAF
Moottorit	8x125 kW	8x115 kW	12x230 kW (vaunupari: 6x230kW)
Kokonaisteho	1000 kW	920 kW	2760 kW (vaunupari: 1380 kW)

Jokaisessa metron vaunuparissa on neljä telikohtaista ajomoottoripiiriä, joihin kuuluvat kaksi rinnankytkettyä oikosulkumoottoria, jarruvastus sekä edellisiä ohjaava telikäyttöyksikkö. M300-junassa yhden vaunun telit ovat moottorittomia juoksutelejä, mutta muuten kaikki metrojunan telit ovat vetäviä, niissä on kaksi akselia ja jokaista akselia käyttää oma oikosulkumoottori. Moottoria voidaan ohjata molempiin pyörimissuuntiin eli joko moottorina (veto) tai generaattorina (jarrutus). Jokaisen telin kahta moottoria ohjataan ja syötetään rinnan yhdellä vaihtosuuntaajalla. Junaa kiihdytettäessä moottorien jännitettä nostetaan taajuuteen verrannollisena. Kun täysi jännite on saavutettu, nostetaan taajuutta edelleen, kunnes juna on saavuttanut täyden nopeuden.

Jarruttaessa taajuutta puolestaan lasketaan, jolloin moottorit siirtyvät toimimaan generaattoreina. Kuvassa 3.4 on esitetty M200-vaunusarjan päätytelin rakenne. Sekä M100- että M300-sarjan telit ovat vastaavanlaisia, mutta M300-sarjassa yhden vaunun telit ovat juoksutelejä eli niissä ei ole moottoreita. Moottoreiden tehot ja lukumäärät löytyvät taulukosta 3. [22] [23]



Kuva 3.4 - M200-sarjan päätytelin rakenne. Virroittimet sijaitsevat ainoastaan vaunuparin päätyteleissä. [23]

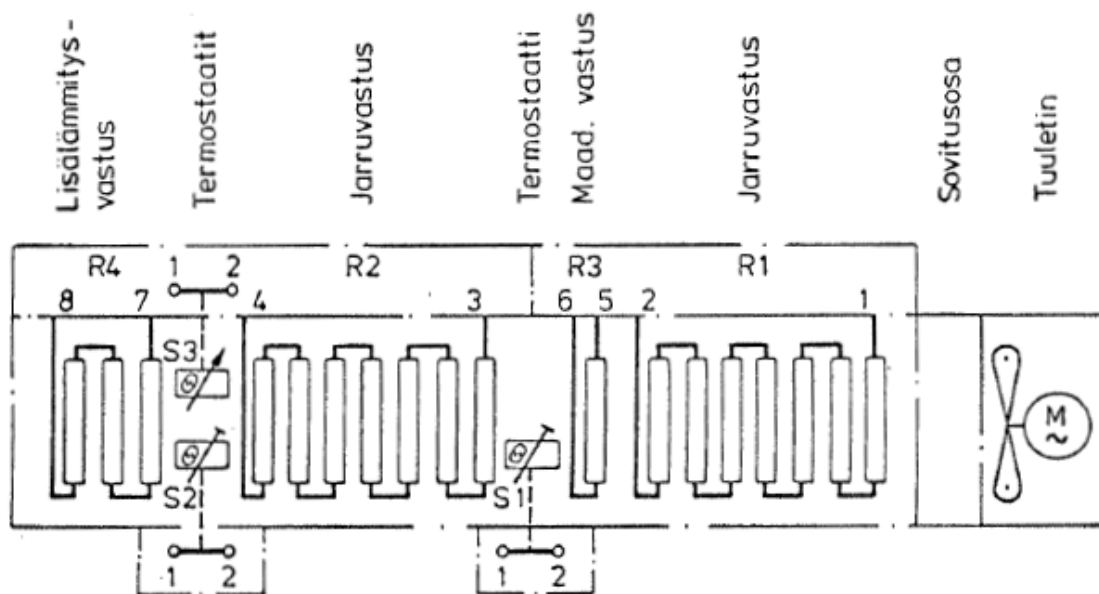
Telikäyttöyksikköön kuuluvat verkkosuodatin, kolmivaiheinen invertteri sekä jarrukatkoja. Verkkosuodattimen ansiosta telikäyttöyksikkö ottaa virtakiskosta tasavirtaa, vaikka ajomoottoreita ohjataan pulssimaisella jännitteellä. Invertteri muuntaa tasavirran vaihtovirraksi moottoreita varten. Jarrukatkoja on pakkokommutoitu tyristorikytkin, joka kontrolloi jarruvastuksille kulkeutuva virtaa. Sitä ohjataan suoraan tasajännitteen mukaan siten, että tasajännite pysyy jarrutuksessa halutussa 950 V:n arvossa. [22]

Metrovaunun ensisijainen jarru on sähköjarru, joka jarruttaa vaunun lähes pysähdyksiin asti, jonka jälkeen mekaaninen jarru korvaa automaattisesti sähköjarrun ja toimii pysäytys- ja pysäköintijarruna. M100- sarjan junissa mekaanisena jarruna toimii jousijarru ja M200-junissa paineilmajarru. Mekaaninen jarru toimii myös sähköjarrun varajärjestelmänä vikatilanteessa. M200-junista löytyy myös jousijarrut, joita käytetään pysäköintijarruna vaunujen pitempiäaikaisissa pysäköinneissä ilman paineilmaa sekä paineilmajarrun varajärjestelmänä. Vaunut on varustettu myös magneettisilla kisko-jarruilla, jotka toimivat hätäjarruina. [22] [23]

Kuten raitiovaunuissakin, sähköjarrua käytettäessä vaunun ajomoottorit toimivat generaattoreina ja syntyvä jarrutusenergia syötetään jarruvastuksille, josta sitä käytetään

matkustamon lämmitykseen. Metrossa jarruvastukset on sijoitettu vaunun alle katon sijasta. [23]

Jarruvastusyksikkö on vaunukohtainen ja siihen kuuluvat kummankin ajomoottori-piirin jarruvastus, vaunun maadoitusvastus sekä lisälämmitysvastus. Jarruvastukset muuttavat jarrutuksen aikana ajomoottoreissa syntyvän jarrutusenergian lämmöksi, jota voidaan käyttää matkustamon lämmitykseen. Maadoitusvastus estää vaarallisten jännitteiden syntymisen rungon maadoitusarjan mahdollisesti irrotessa. Lisälämmitysvastuksia käytetään, jos matkustamoa tarvitsee lämmittää enemmän kuin mitä jarruvastukset saavat sitä lämmitettyä. Jarruvastusyksikön kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 3.5. [24]



Kuva 3.5 - M100-metrojunan jarruvastusyksikön kytkentäkaavio. [24]

3.2 Sähkösyöttöjärjestelmä

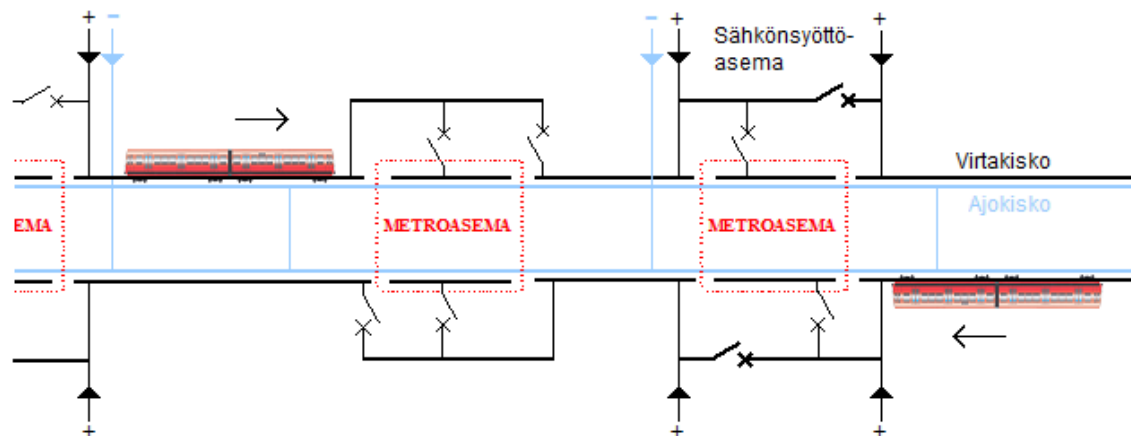
Nykyisessä metrojärjestelmässä on 11 syöttöasemaa, joille sähkö tulee Helsingissä raitiovaunuverkon sähkösyöttöä vastaavasti Helen Sähköverkon 10 kV:n tai 20 kV:n verkosta. Länsimetron Espoon osalle sähkö saadaan Caruna Espoo Oy:n (entinen Fortum Espoo Distribution Oy) 20kV:n keskijänniteverkosta. [25]

Sähkösyöttöasemia ei ole jokaisen metroaseman yhteydessä, vaan niitä on rakennettu nykyiselle metrolinjalle noin 2-2,6 km:n välein. Länsimetron ensimmäiseen osaan sähköasema tulee kuuden metroaseman läheisyyteen kahdeksasta [26]. Tämä tarkoittaa, että syöttöasemien etäisyydet ovat suunnilleen samaa luokkaa nykyisen järjestelmän kanssa. Syöttöasemia tulee olla riittävin etäisyyksin toisistaan, jotta junien kiihdyttäessä virtakiskon jännite syöttöasemien välillä ei laske liian alas, vaan pysyy junan laitteille hyväksytyissä rajoissa. [25]

Syöttöjärjestelmä on rengasverkko, jolloin minkään yksittäisen kaapelin vioittuminen ei keskeytä sähkönsyöttöä. Suojausteknisistä syistä rengasverkko on normaalitilanteesta aina jostain kohtaa auki, mutta se saadaan kytkettyä tarvittaessa kiinni. Syöttöjärjestelmä on myös suunniteltu niin, että yksittäinen sähköasema voi olla poissa käytössä ja tällöin viereiset syöttöasemat kykenevät korvaamaan sen. Sähköasemien välisille virtakisko-osuuksille tulee kaksipuoleinen sähkönsyöttö eli osuutta syötetään molemmista suunnista. [25]

Raitiovaunujärjestelmästä poiketen metroissa käytetään tasasähköä 750 V:n nimellisjännitteellä. Metrojuna ottaa virran radan sivulla kulkevan virtakiskon alapuolelta virroittimilla, jotka sijaitsevat päätyteleissä junan molemmin puolin. Vaunuparin neljästä virroittimesta ainakin yhden on oltava kokoajan kosketuksissa virtakiskoon, jotta vaunupari saa käyttöönsä tarvitsemansa energian. Vaunuparin kahden vaunun, A:n ja B:n, välillä on siis sähkönsyöttö, mutta toisiin vaunupareihin ei ole. Paluuvirtajohtoina toimivat metroradan ajokiskot ja paluuvirtakaapelit. [13]

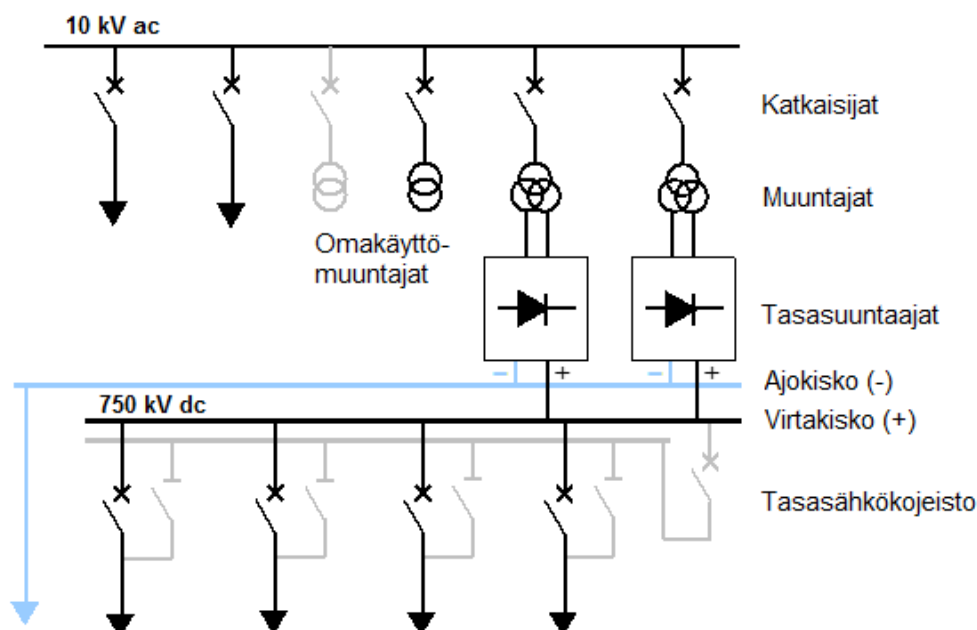
Virtakisko ei ole yhtenäinen koko metrolinjan matkalta, vaan se on jaettu useisiin eri virtakiskojaksoihin. Ratasähkösyötön periaate on esitetty kuvassa 3.6. Metroasemat ovat aina oma virtakiskojaksonsa ja lisäksi kummankin raiteen virtakiskoihin on erillinen syöttö, jotta esimerkiksi aseman toinen kisko saadaan haluttaessa pois käytöstä, eikä toimenpide vaikuta muuhun verkkoon. Turvallisuussyistä asemilla virtakisko on sijoitettu sille puolelle junaa, jossa laituria ei ole, mutta asemien välillä virtakisko sijaitsee junan kulkusuuntaan katsottuna vasemmalla puolella. [13]



Kuva 3.6 - Ratasähkösyötön periaatekuva. Metron virtakisko ei ole yhtenäinen, vaan se on jaettu useisiin virtakiskojaksoihin, joista metroasema on aina omansa. [18]

Sähkönsyöttöasemilla 10 kV:n tai 20 kV:n vaihtosähkö tasasuunnataan 750 V:n tasasähköksi. Yleensä syöttöasemilla on kaksi tasasuunninyksikköä, mutta Ruoholahdessa ja Metrovarikolla on molemmilla vain yksi. Tasasuunninyksikköön kuuluu joko öljy- tai kuivamuuntaja sekä 12-pulssinen tasasuuntaaja. Syöttöaseman yleiskaavio on esitetty kuvassa 3.7. [25] Kuvassa näkyvät myös sähkönsyöttöaseman omakäyttömuuntajat, joiden kautta kulkee itse asemarakennuksen tarvitsema sähkö, esimerkiksi valaistus ja laitteistojen toiminnan vaatima sähkö.

Metrojunan pääjännitepiirissä jännite saa vaihdella 525–950 V:n välillä, kiihdytyksen nimellisjännitteen ollessa 750 V ja jarrutuksen 950 V. Virtakiskon jännite laskee junan kiihdyttäessä ja on nimellisjännitettä korkeampi tyhjäkäynnillä. Tasasähkön plus-napa on kytketty virtakiskoihin ja miinus-napa ajokiskoon. [23] [27]



Kuva 3.7 - Metron syöttöaseman yleiskaavio. [27]

3.3 Jarrutusenergian hyödyntäminen tällä hetkellä

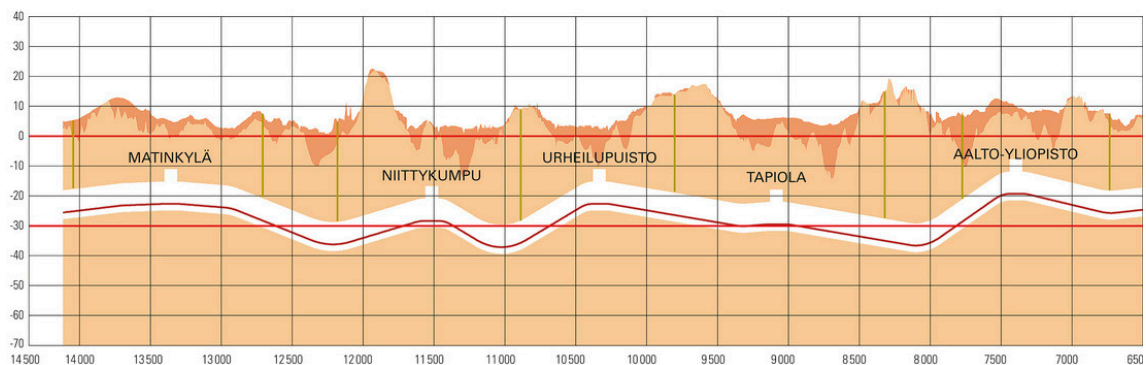
Tässä kappaleessa kuvataan kuinka jarrutusenergiaa hyödynnetään HKL:n metrokalustossa tällä hetkellä eli kuvattuina ovat ainoastaan nykyiset sovellukset ja ratkaisut. Jarrutusenergian erilaisia hyödyntämismahdollisuuksia tulevaisuudessa on kuvattu kappaleessa 6.3.2. Luvussa ei myöskään oteta kantaa menetelmien toimivuuteen tai implementoinnin perusteluihin vaan näitä käsitellään niin ikään kappaleessa 6.3.2.

Raitiovaunuissa jarrutusenergian hyödyntäminen poikkesi vaunutyypeittäin, mutta metroissa kaikki vaunutyyppit hyödyntävät jarrutusenergiaa matkustamon lämmitykseen jarruvastuksen kautta. Metroissa moottorijarrutuksessa syntynyt sähkövirta ohjataan jarruvastukseen, jonka lämmittämä lämmin ilma puhalletaan metrovaunun matkustamoon. Kun lämmitystä ei tarvita, ohjataan ylimääräinen lämmin ilma säätöpellin avulla ulos. [7]

Tällä hetkellä metrovaunujen jarrutusenergian takaisinsyöttö verkkoon on estetty diodein. Myös uudet M300-junat on varustettu täysin valmiiksi jarrutusenergian takaisinsyöttöä varten, mutta syöttö on estetty diodilla. Jarrutusenergian takaisinsyöttö vaihtosuuntauksen kautta 10 kV:n tai 20 kV:n verkkoon on todettu vuonna 2008 kannattamattomaksi syöttöasemien kalliiden laiteinvestointien ja siirtohäviöiden suuruuden vuoksi. Lisäksi oltiin huolissaan syntyvistä häiritsevista jännitepiikeistä ja yliaalloista. [28]

HKL:lle on tehty diplomityö metroliikenteen jarrutusenergian hyötykäyttömahdollisuuksista vuonna 2012. Työssä tutkittiin kuinka suurta osaa metron jarrutusenergiasta voidaan hyödyntää matkustamon lämmitykseen tai takaisinsyöttöön mittaamalla jarruvastukselle menevään virtaa sekä lämmityksen säätöpellin asentoa. Kyseisen työn tuloksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 6.1.2.

Metroradan suunnittelussa on myös tavallaan pyritty hyödyntämään jarrutusenergiaa. Metrot kulkevat omilla radoillaan ja Länsimetron valmistuttua pääosin maan alla, jolloin rataprofiili on voitu suunnitella halutuksi. Kuvassa 3.8 on esitetty osa Länsimetron pätkän syvyyskartasta, josta selviävät radan syvyysvaihtelut. Rata on pyritty myös Helsingin puolella rakentamaan siten, että asemalta lähdettäessä metro kulkee alamäkeen ja asemalle saavuttaessa ylämäkeen, jolloin korkeuseroista saadaan luontaista apua kiihdytykseen ja jarrutukseen.



Kuva 3.8 - Länsimetron osan pituusleikkaus korkeuksilla. Korkeuseroilla pyritään saamaan luontaista apua metron kiihdytykseen ja jarrutukseen. [6]

4 Jarrutusenergian hyödyntäminen

Jarrutusenergiaa voidaan hyödyntää ottamalla energiaa talteen energiavarastoon syöttöasemille, radan varteen, asemille tai kaluston mukana kulkevaan varastoon. Vaihtoehtoisesti energia voidaan käyttää liikkuvassa kalustossa ilman erillistä energiavarastoa esimerkiksi lämmitykseen tai energia voidaan syöttää takaisin verkkoon. Jarrutusenergian talteenottoa energiavarastoon, kuten akkuihin, käytetään jo sähköautoissa ja -busseissa sekä hybridiajoneuvoissa.

Tässä luvussa tarkastellaan jarrutusenergian varastointitekniikoita liittyen sekä mahdollisuutta syöttää energiaa takaisin verkkoon HKL:n järjestelmissä. Energiavaraston sijoituspaikkaa ja eri vaihtoehtojen soveltuvuutta HKL:n järjestelmiin tarkastellaan luvussa 6.3. Näin ollen myös liikkuvan kaluston mahdollisuutta hyödyntää jarrutusenergia suoraan ilman energiavarastoa tarkastellaan kyseissä luvussa. Lisäksi luvussa 4.2 tarkastellaan lyhyesti energian talteenottoa linja- ja henkilöautoliikenteessä.

4.1 Jarrutusenergian varastointitekniikat

Energian varastointijärjestelmiä voidaan käyttää jarrutusenergian talteenottoon, mutta myös syöttöverkon jännitteen tasaamiseen. Energiavaraston on tarkoitus purkaa varastoa ja syöttää energiaa takaisin verkkoon, kun verkon jännite laskee alle asetetun arvon. Varaston jännitteen tulee myös pysyä tasolla, jolla se pystyy säilömään energiaa. Energiavaraston sijoitus asettaa myös rajoitteita järjestelmälle, sillä liikkuvaan kalustoon tai keskelle kaupunkia sijoitetun varaston tulee olla mahdollisimman kompakti kooltaan. Muita perusvaatimuksia liikennejärjestelmän energiavarastolle ovat muun muassa varaston energiatehokas lataus ja purkaus, pienet häviöt, hyvä luotettavuus, korkea lataus-purkaussyklien lukumäärä sekä suurten tehojen varastointikyky. Näiden lisäksi myös suhteellisen alhaiset kustannukset sekä se, ettei varastosta ole haittaa sen lähiympäristölle tai luonnolle, ovat tärkeitä seikkoja. [29]

Jarrutusenergian talteenotto ja varastointi on mahdollista toteuttaa monella tavalla, mutta monet varastointitekniikat voidaan rajata pois tarkastelusta epärelevantteina edellisiin järjestelmävaatimuksiin vedoten. Pumppuvoimalaitokset ja paineilma-järjestelmät ovat liian suuria ja niiden lataussyklit ovat liian hitaita raideliikenteen käyttötarkoituksiin. Vedyn tai metaanin kemiallisiin reaktioihin perustuvilla varastojärjestelmillä on puolestaan liian suuret häviöt prosessissa sekä liian hidas latausaika. Lämpövoimaan perustuvat varastointimenetelmät tarvitsevat lisälaitteita energian muuntamiseen ja eivät siten sovellu liikennöintisovelluksiin. Suprajohtavat magneettiset energiavarastot (SMES) ovat vielä vahvasti kehitysasteella ja niiden kustannukset ovat korkeat. Siten ne soveltuvat vain harvoihin sovelluksiin. Näin ollen liikennejärjestelmien energiavarastoiksi soveltuvat ainoastaan akut, superkondensaattori sekä vauhtipyörä. [29]

4.1.1 Akut

Akut ovat tyypillisimpiä energiavarastoja. Akkuja käytetään esimerkiksi sähköasemilla varaenergiälähteenä sekä energian varastointiin sähkö- ja hybridibusseissa. Näissä sovelluksissa akkujen varauksen pitkäkestoisuudesta on hyötyä ja se on jopa välttämätöntä.

Akku on sähkökemiallinen varasto, joka muuttaa sähköenergian kemialliseksi energiaksi ladatessaan ja toimii päinvastoin purettaessa. Akkujen lataus- ja purkuajat ovat esimerkiksi superkondensaattoreita huomattavasti hitaampia, mutta toisaalta akkujen itsepurkautuvuus on hitaampaa eli ne säilyttävät varauksensa pidempään. Akkuja voidaan optimoida sovelluskohtaisesti suosien esimerkiksi elinikää tai hintaa.

Lyijyaku on yksi vanhimpia akkutekniikoita ja siten sen tekniikka on varsin kehittynyttä. Se on myös yksi halvimmista akkutyypeistä ja siksi yleisesti käytetty, esimerkiksi melkein jokaisessa autossa on lyijyaku moottorin käynnistystä ja auton sähkölaitteita varten. Lyijyakkusovelluksia löytyy myös suuremmista kokonaisuuksista, esimerkiksi Berliinissä lyijyakustoa (14 MWh ja 17 MW) on käytetty sähköverkon taajuuden ja jännitteen tasaamiseen sekä Saksan Hernessä aurinkoenergian varastointiin (1,2 MWh ja 1,2 MW). Lyijyakut toimivat hyvin alhaisissa lämpötiloissa, mutta niillä on muihin akkuihin verrattuna alhaiset teho- ja energiatheydet. Akuilla saataisiin aikaan järjestelmä, jolla olisi riittävästi tehoa soveltuakseen liikennesovelluksiin ja joka kykenee varastoimaan riittävästi energiaa. Lyijyakkujen huonona puolena on kuitenkin liikennesovelluksiin liian alhainen lataus-purkaussyökiien lukumäärä akuston eliniän aikana. Lisäksi syväpurkautuminen heikentää lyijyakun elinikää huomattavasti. [29] [30]

Uusi kehittäly lyijyakkujen saralla on UltraBattery, joka on lyijyakun ja superkondensaattorin hybridi, jossa hiilielektroni on yhdistetty negatiiviseen lyijyelektroniin. Kondensaattori parantaa akun tehoa ja elinikää toimimalla puskurina ladatessa ja purettaessa akkua. [31]

Nikkelimetallihybridiakut (NiMH) ovat melko halpoja, eikä niistä ole suoraa vaaraa ympäristölle, kuten niiden edeltäjissä nikkelikadmiumakuissa (NiCd). Akkutyyppiä käytetään kuluttajaelektroniikassa, mutta myös hybridiautoissa akkutyyppin suhteellisen korkean tehosiheyden, turvallisuuden ja suhteellisen pitkän käyttöiän takia. NiMH-akkujen huonona puolena on nopea itsepurkautuvuus verrattaessa muihin akkuihin. Akkutyyppiä ei tietävästi ole käytetty suurissa talteenottokokonaisuuksissa, joten on melko epätodennäköistä, että sitä tultaisiin käyttämään syöttöverkossa. [29] [30] [32]

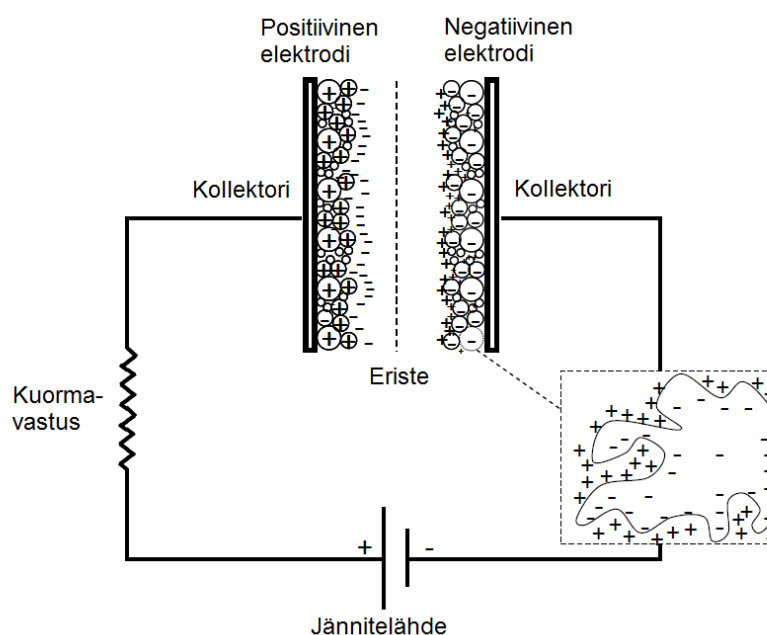
Litiumioniakut ovat nykyään varsin tavallisia, varsinkin matkapuhelinten ja kannettavien tietokoneiden akkuina. Näiden lisäksi litiumioniakkuja käytetään myös sähkö- ja hybridiajoneuvoissa, mutta myös suurempia energian talteenottojärjestelmiä on rakennettu muun muassa varastoimaan aurinkoenergiapuoistojen tuottamaa energiaa sekä toimimaan sähköverkon varaenergian lähteenä ja jännitetason tasaajana. Akkutyyppin hyviä puolia ovat korkeat teho- ja energiatheydet muihin akkutyyppisiin verrattuna, vähäinen itsepurkautuvuus sekä pitkä elinikä. Litiumioniakut kuitenkin tarvitsevat akustonvalvontajärjestelmän valvomaan niitä sekä pitämään kennojen jännitteen tasaisena ja sopivalla tasolla. [29] [30]

Lyijy- ja NiMH-akuilla on rajalliset kehitysnäkymät tulevaisuudessa ja nykyisin panostetaan eniten litiumioniakkujen kehitykseen, sillä niissä nähdään suurin potentiaali. Lisäksi suuret NiMH-akut tarvitsevat paljon kallista nikkeliä, joten isot NiMH-akut ovat todennäköisesti kalliita myös tulevaisuudessa. Akkuteknologiaa kuitenkin kehitetään jatkuvasti ja hyviä ratkaisuja saadaan aikaiseksi solutasolla ja laboratorio-olosuhteissa. Mikäli näitä ratkaisuja saataisiin tulevaisuudessa toimivina myös kaupalliseen tuotantoon, ottaisi akkuteknologia varmasti suuria kehitysaskelaita. [31] [33]

4.1.2 Superkondensaattorit

Superkondensaattorit ovat kondensaattoreita, jotka pystyvät varastoimaan huomattavasti tavallisia kondensaattoreita enemmän energiaa eli niihin verrattuina superkondensaattoreilla on suuri energiatiheys ja kapasitanssi. Tämä johtuu superkondensaattoreiden huokoisista hiilielektrodeista, joilla on suuri pinta-ala. Tätä on havainnollistettu kuvassa 4.1. Akkuihin verrattuina superkondensaattoreiden energia-tiheys on kuitenkin selvästi pienempi. Useimmilla superkondensaattoreilla energiatiheys on 3-5 Wh/kg, mutta esimerkiksi lyijyakulla energiatiheys on 25–35 Wh/kg. [34]

Superkondensaattoreiden toiminta perustuu energian varastointiin sähkökenttään, joten ne soveltuvat parhaiten sovelluksiin, joissa vaaditaan nopeita energian lataus- ja purkuaikoja suurella virralla. Sähkökenttään varastoitua energiaa ei tarvitse muuttaa muodosta toiseen kuten akkujen sähkökemiallisessa varastoinnissa kemiallisesta energiasta sähköksi ja päinvastoin. Tämän vuoksi superkondensaattoreiden lataus- ja purkausajat ovat nopeita. [34]



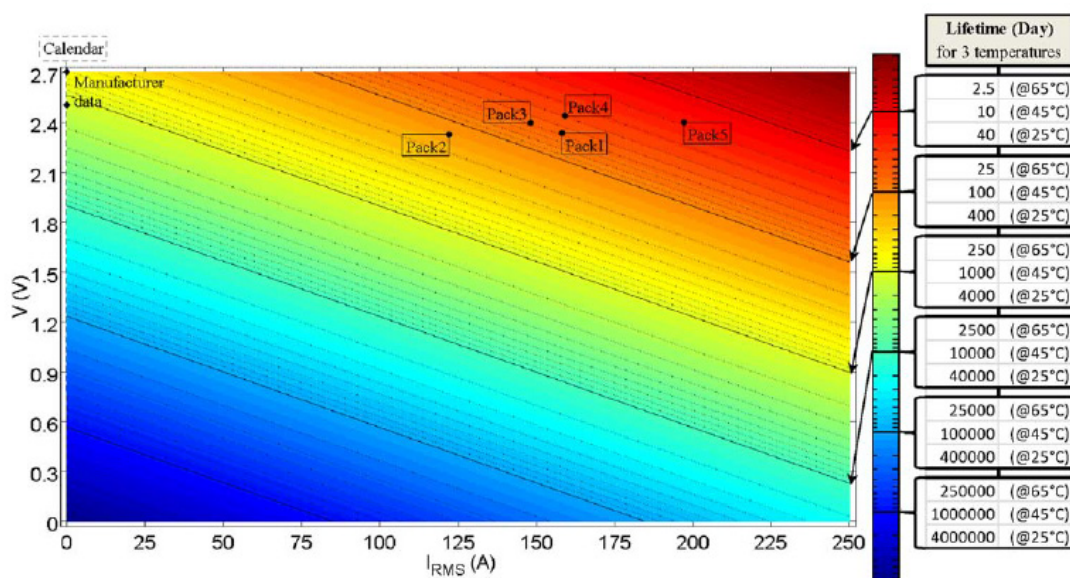
Kuva 4.1 - Superkondensaattorin toimintaperiaate. Energia varastoituu elektrodien väliseen sähkökenttään. [35]

Superkondensaattori muodostuu kahdesta, usein hiilipohjaisesta, elektrodista, joiden välissä on puoliläpäisevä eriste ja elektrolyyttiä. Energia varastoituu elektrodien väliin muodostuvaan sähkökenttään elektrolyytin polarisoituessa, eikä näin ollen elektrodien ja elektrolyytin välillä tapahdu minkäänlaista reaktiota. Toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 4.1. [35]

Kaikilla kondensaattoreilla on suurin mahdollinen jännite ja superkondensaattoreiden käyttöjännite onkin normaaleja kondensaattoreita pienempi, yleensä 2,3–2,7 V. Jännitettä voidaan nostaa yli 2,8 V:n, mutta tällöin käyttöikä laskee. Superkondensaattoreita kytketäänkin sarjaan suuremman jännitteen saavuttamiseksi, aivan kuten akuille voidaan tehdä. [36]

Akkuihin verrattuna superkondensaattorien itsepurkautuvuus on korkea. Täyteen ladattu superkondensaattori purkaa puolet energiastaan hieman yli kuukaudessa, kun taas nikkelipohjaisten akkujen itsepurkautuvuus on 10–15 % kuukaudessa. Litiumioniakut purkautuvat itsestään vielä hitaammin, ainoastaan noin viiden prosentin verran kuukaudessa. [36]

Superkondensaattoreita voidaan ladata tuhansia, joissain tapauksissa jopa miljoonia kertoja, kun jännite pysyy enintään nimellisjännitteessä. Elinikään vaikuttavat latausyklien lisäksi lämpötila, jännitetaso ja virta. Superkondensaattoreilla on varsin laaja toiminta-alue lämpötilan suhteen: -40°C - $+70^{\circ}\text{C}$. Lämpötilan nousu, kuten myös virran tai jännitteen nousu, kuitenkin lyhentää superkondensaattorin elinikää. Kuvassa 4.2 on esitetty eliniän riippuvuus edellä mainituista tekijöistä. [37]

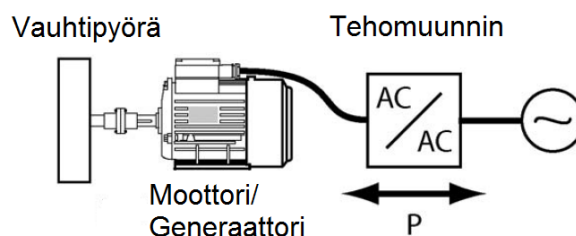


Kuva 4.2 – Superkondensaattorin eliniän arviointi jännitteen ja virran suhteen kolmessa eri lämpötilassa. Lämpötilan nousu heikentää kondensaattorin elinikää. [37]

Jarrutusenergian talteenottoon sähköisessä raideliikenteessä superkondensaattorit ovat hyvin vartenotettava vaihtoehto nopeiden lataus- ja purkuaikojen ansiosta. Toisaalta tekniikka ei ole vielä täysin kehittynyttä, joten superkondensaattorit ovat toistaiseksi melko kalliita energiavarastoja energiayksikköä kohden verrattuna esimerkiksi akkuihin. [34]

4.1.3 Vauhtipyörä

Vauhtipyörä varastoi energiaa pyörivään massaansa ja se soveltuu parhaiten sovelluksiin, joissa vaaditaan suuria tehoja ja energiatiheyttä sekä lukuisia lataus- ja purkukertoja. Moottori kiihdyttää vauhtipyörän massaa energiaa säilöittäessä ja generaattori muuntaa pyörimisenergiaa sähköenergiaksi purettaessa. Laitteen energiahäviöt ovat hyvin suuria ja siksi vauhtipyörät soveltuvatkin ainoastaan energian lyhytaikaiseen säilömiseen. Energian varastointikyky ei heikkene iän myötä kuten kemiallisilla varastoilla käy ja niiden etuna on myös mahdollisuus purkaa energiavarasto täysin tyhjäksi. Esimerkiksi superkondensaattoreilla varaustason pitäminen tarpeeksi korkealla pidentää laitteen elinikää. Vauhtipyörillä on korkeat investointikustannukset, mutta alhaiset käyttökustannukset ja pitkä elinikä. Lisäksi reagointiajat lataus- ja purkupyöntöihin ovat nopeita sekä laitteen tehokkuus ja luotettavuus hyviä. [29] [32]



Kuva 4.3 - Vauhtipyörän tyypillinen rakenne. [32]

Vauhtipyöräjärjestelmiä on erilaisia, mutta ne jaotellaan usein nopeisiin ja hitaisiin järjestelmiin pyörimisnopeuden mukaan raja-arvon ollessa noin 10 000 kierrosta/min. Pyörimisnopeus riippuu käytettävästä materiaalista, vauhtipyörän muodosta ja pituudesta, mutta se myös määrittää millaiset sähkölaitteet järjestelmään voi kytkeä. Vauhtipyöräjärjestelmä koostuu vauhtipyörästä lisäksi myös sähkömoottorista ja -generaattorista, jotka ovat usein sama laite, kuten kuvasta 4.3 voidaan nähdä. Vauhtipyöräjärjestelmään kuuluu kuvan laitteiden lisäksi toki kotelointi sekä muita osia. Järjestelmän koon vuoksi ne soveltuvat parhaiten syöttöasemalla tapahtuvaan energian varastointiin. [32]

Vauhtipyöräjärjestelmiä on käytössä raideliikenteessä jarrutusenergian talteenottoa varten esimerkiksi Hampurin metrossa. Ensimmäinen vauhtipyörä asennettiin 2007 ja toinen vuonna 2010. Vauhtipyörä valittiin tekniikan lyhyen reaktioajan ja suhteellisten alhaisten kustannusten takia. Energiasäästöjen arvioidaan olevan 430 000 kWh vuodessa. [29]

4.1.4 Yhteenveto ja vertailu

Jarrutusenergian talteenottoa varten löytyy muutamia varteenotettavia menetelmiä. Superkondensaattorit ja vauhtipyörä ovat tällä hetkellä raideliikenteen tarpeisiin parhaiten soveltuvat tekniikat. Eri talteenottotapoja on vertailtu taulukossa 4.

Akut ovat olleet paras vaihtoehto sähköautoissa, mutta raideliikenteen käyttötarpeisiin vaaditaan huomattavasti suurempia lataus- ja purkaussyklimääriä kuin mitä eri

akkutyypit pystyvät tarjoamaan. Näin ollen toistaiseksi akut eivät ole varteenotettava vaihtoehtojarrutusenergian talteenotolle raideliikenteessä. Akkutyypejä on kuitenkin monia ja niitä kehitetään jatkuvasti sähköautojen tarpeisiin. Saattaa siis olla, että tulevaisuudessa raideliikennekin pystyy hyödyntämään akkuja jarrutusenergian talteenotossa.

Taulukko 4 - Energiavarastojen vertailua. [29] [31]

Tyyppi	Energia-tehokkuus (%)	Energia-tiheys (Wh/kg)	Tehotiheys (W/kg)	Elinikä (sykliä)	Itsepur-kautuvuus
Lyijyakku	75–80	25–35	100	1200	2-10%/kk
NiMH	70	50–80	74–240	1000	15–20%/kk
Litiumioni	90–95	75–200	180–410	3000	< 5%/kk
Superkon-densaattori	95	3-5	2 000–10 000	~ 500 000	< 1%/pvä
Vauhtipyörä	90–95	5–100	400–1500	> 1 000 000	3–20%/h

Sekä vauhtipyörillä että superkondensaattoreilla on selviä etuja akkuihin verrattuna: molemmilla tekniikoilla on hyvä energiatehokkuus, pitkä elinikä lataussykleissä mitattuna sekä nopeat lataus- ja purkausajat. Vauhtipyörien tekniikka on kehittyntä ja sillä on pitkä elinikä. Superkondensaattoriteknologia puolestaan on vasta kehitysasteella eli toistaiseksi melko kalliiden superkondensaattorijärjestelmien voidaan odottaa halpenevan tekniikan kehittyessä tulevaisuudessa. Superkondensaattorit pystyvät toimimaan hieman vauhtipyöriä nopeammin ladatessa ja purkaessa ja ovat lisäksi niitä turvallisempia. Vauhtipyörillä vikaantumisesta aiheutuva vaaratilanne voi olla esimerkiksi kiekon sinkoaminen pois kotelostaan suurella nopeudella. Tämän vuoksi vauhtipyöräjärjestelmät on usein sijoitettu maanalaisiin tiloihin. Superkondensaattorit ja akut soveltuvat energiavarastoiksi sekä liikkuvaan kalustoon, että sähkönsyöttöasemalle. Vauhtipyörä tulisi sen sijaan sijoittaa syöttö-asemalle.

Edellä mainituin perustein superkondensaattorit vaikuttaisivat olevan tulevaisuudessa varteenotettavin tekniikka jarrutusenergian talteenottoon ja siksi kyseistä tekniikkaa ja sen kehitystä tulee seurata.

4.2 Energian talteenotto linja-autoliikenteessä

Jarrutusenergian talteenottoa hyödynnetään jo henkilö- ja linja-autoliikenteessä ja käytössä on sekä täysin sähköisiä että hybridi ajoneuvoja. Helsingin Seudun Liikenne (HSL) on päättänyt hankkia täyssähköisiä linja-autoja koeliikennöintiin vuosille 2015–2018 ja HSL:n alueella on jo liikennöimässä joitakin hybridimalleja. Ladattaville henkilöautoille on rakennettu muutamia latauspisteitä esimerkiksi Helsinkiin, mutta sähkö- tai hybridi autoja on silti vain marginaalinen osa perinteisiin autoihin verrattuna.

Sähköisten ajoneuvojen energian talteenotto on kehittynyt, mutta siinä on yhä ongelmia, jotka ovat toistaiseksi estäneet ajoneuvotyypin nousun suureen suosioon.

Sähköajoneuvon suurimman ongelmat liittyvät akkuihin, tarkemmin sanottuna niiden painoon ja kokoon, energia- ja tehotehyyteen sekä näistä muodostuvaan toimintasäteeseen yhdellä latauksella kulkemaan. Henkilöautossa akun paino on suuri osa auton kokonaispainosta, mutta linja-autoissa osuus on pienempi. Toisaalta linja-autot tarvitsevat enemmän tehoa ja energiaa kulkeakseen, mikä puolestaan vaatii enemmän akkukapasiteettia tai enemmän latauspisteitä linjan varrelle.

Hybrideillä tarkoitetaan ajoneuvoja, joissa on sekä sähkö- että polttomoottori. Ajoneuvo käyttää sähköä, kunnes akku on tyhjä, jonka jälkeen se siirtyy käyttämään perinteistä polttomoottoria. Hybridejä on kahdenlaisia, plug-ineja sekä perinteisiä. Perinteiset hybridit lataavat akkunsaa polttomoottorin kautta ja plug-init saavat virtansa puolestaan ulkopuolisesta lähteestä, esimerkiksi sähköauton latauspisteestä. Perinteisellä hybridillä ei sinänsä saavuteta suurta hyötyä energian jakaumassa, polttomoottorin ladatessa sähkömoottoria, mutta polttoainetta järjestelmä auttaa säästämään. Hybridiajoneuvojen akku pystyy vastaanottamaan jarrutusenergiaa ja lisäksi polttomoottori voidaan mitoittaa käynnistettäväksi, silloin kuin se on taloudellisesti kannattavimmalla toiminta-asteella. HSL:n raportin [38] mukaan linja-autoliikenteen hybridisoinnilla saavutettava säästö riippuu ajosyklistä. Samainen raportti toteaa myös, että kaupunkibussi on varsin otollinen hybridisoinnin kohde, ja että polttoaineen säästö on tyypillisesti noin 25–30 %.

Sähköauto on kallis investointi, mutta sen käyttö on melko edullista. Näin ollen sähköajoneuvot, joita käytetään paljon, esimerkiksi sähköbussit, on huomattavasti helpompi saada kannattaviksi kuin yksityiset henkilöautot. Joukkoliikenne myös kulkee ennalta määrättyjä reittejä pitkin, jolloin bussin energiavarastolta vaadittava kapasiteetti tiedetään etukäteen. [38] Sähköbussit ratkaisisivat yhden pääkaupunkiseudun hankalimmista ympäristöhaasteista, typpidioksidiraja-arvojen ylittymisen, vaikka nykyiset hybridibussit ja uudet bussimallit ovat myös yhä pienempipäästöisiä. Lisäksi sähköbussit vähentäisivät liikenteen melua. [39]

HSL on asettanut tavoitteekseen joukkoliikenteen päästöjen, niin hiilidioksidi- kuin pienhiukkaspäästöjen, merkittävän vähentämisen vuoteen 2025 mennessä. Näiden tavoitteiden saavuttaminen edellyttää muun muassa bussikaluston uusimista, uuden teknologian käyttöönottoa sekä palveluiden tehostamista. Bussiliikenteen osittainen sähköistäminen auttaa tavoitteiden saavuttamista merkittävästi. HSL:n tavoitteena on lisätä alueellaan liikennöivien sähkö- ja hybridibussien lukumäärää selkeästi seuraavan kymmenen vuoden aikana, kuten käy ilmi taulukosta 5. [39]

Taulukko 5 - Sähkö- ja hybridibussien suunniteltuja osuuksia HSL:n alueen ajoneuvokannasta. [38]

Vuosi	Sähköbussit	Hybridibussit
2015	1 %	2,5 %
2020	10 %	12 %
2025	30 %	22 %

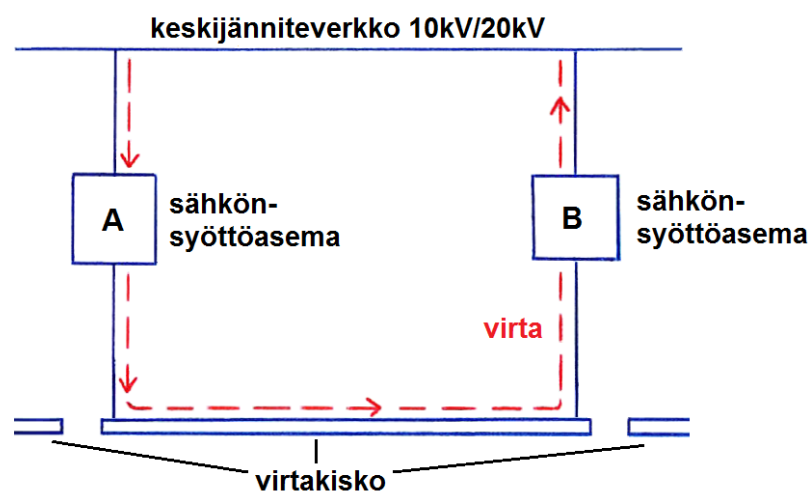
HSL:n hallitus päätti kokouksessaan 20.1.2015 käynnistää ePELI-kehityshankkeen, jossa HSL:lle hankitaan kaksitoista sähköbussia. Hanke kestää neljä vuotta, 2015–2018, jonka aikana hankittuja busseja koeliikennöidään Helsingissä ja Espoossa. Helsingin

kaupunki tulee vastaamaan latausinfrastruktuurin järjestämisestä ja hankkeeseen on alustavasti kaavailtu kuutta pikalatausasemaa. Hankittavien bussien lukumäärä jää alle suunnitellun 1 %:n, mutta kyseessä on HSL:n mukaan tarvittava laajuus uskottavalle pilottihankkeelle sekä suurimpien bussioperaattorien sitouttamiselle uuden teknologian käyttöönottoon. Lukumäärä ei kuitenkaan ole niin suuri, että se sekoittaisi normaalin liikenteen kilpailutusta. [39]

4.3 Jarrutusenergian takaisinsyöttö verkkoon

Takaisinsyöttö verkkoon ei tässä diplomityössä tarkoita syöttöä raitio- tai metroliikenteen tasasähköverkkoon, vaan vaihtosähköiseen keskijänniteverkkoon. Keskijänniteverkko ei ole HKL:n omistuksessa, joten toimintatavoista tulisi sopia myös verkon omistajan kanssa. Vuonna 2008 HKL:n sisäisessä selvityksessä [28] on todettu kustannusten nousevan liian suuriksi, että takaisinsyöttöön kannattaisi investoida. Takaisinsyötön järjestäminen keskijänniteverkkoon vaatisi muun muassa investointeja sähkönsyöttöasemille, jotta tasasähkö saataisiin takaisin vaihtosähköksi. Metrojunissa on tällä hetkellä takaisinsyötön estävät diodit, mutta nämä on teknisesti helppo poistaa.

Takaisinsyöttö keskijänniteverkkoon ei kuitenkaan ole ainoastaan taloudellinen ongelma. Suurin osa HKL:n metro- ja raitiotiejärjestelmän syöttöverkosta on toteutettu kaksipuoleisella syötöllä. Tämä aiheuttaa ongelmia, mikäli energiaa haluttaisiin syöttää takaisin keskijänniteverkkoon. Kuvassa 4.4 on havainnollistettu tätä tilannetta. Mikäli takaisinsyöttö keskijänniteverkkoon olisi teknisesti mahdollista, olisi menetelmän ongelmana, että keskijänniteverkon virta alkaisi kulkea tasasähköjärjestelmän läpi. Ongelma voitaisiin ratkaista siirtymällä täysin yksipuoleiseen syöttöön, mutta kaksipuoleista pidetään käyttövarmuuden kannalta huomattavasti parempana, joten muutostoiimiin ei ole ryhdytty.



Kuva 4.4 - Keskijänniteverkkoon takaisinsyöttämisen ongelma on kaksipuolisen syöttöperiaatteen mahdollistama keskijänniteverkon virran kiertäminen tasasähköjärjestelmän läpi.

5 MLNRV-raitiovaunun jarrutusenergian mittaukset

Tässä luvussa esitellään jarrutusenergian hyötykäytön mittauksia MLNRV I -raitiovaunussa. Kappaleessa 5.1 kerrotaan työn mittausjärjestelyistä ja kappaleessa 5.2 esitetään mittautulokset. Mittaukset tehtiin, koska haluttiin saada todenmukainen arvio raitiovaunun jarrutusenergian hyödyntämispotentialista. Metrosta on tehty vastaavanlainen mittaus vuonna 2009 [7] ja nyt saataisiin raitiovaunuista vertailukelpoisia arvoja.

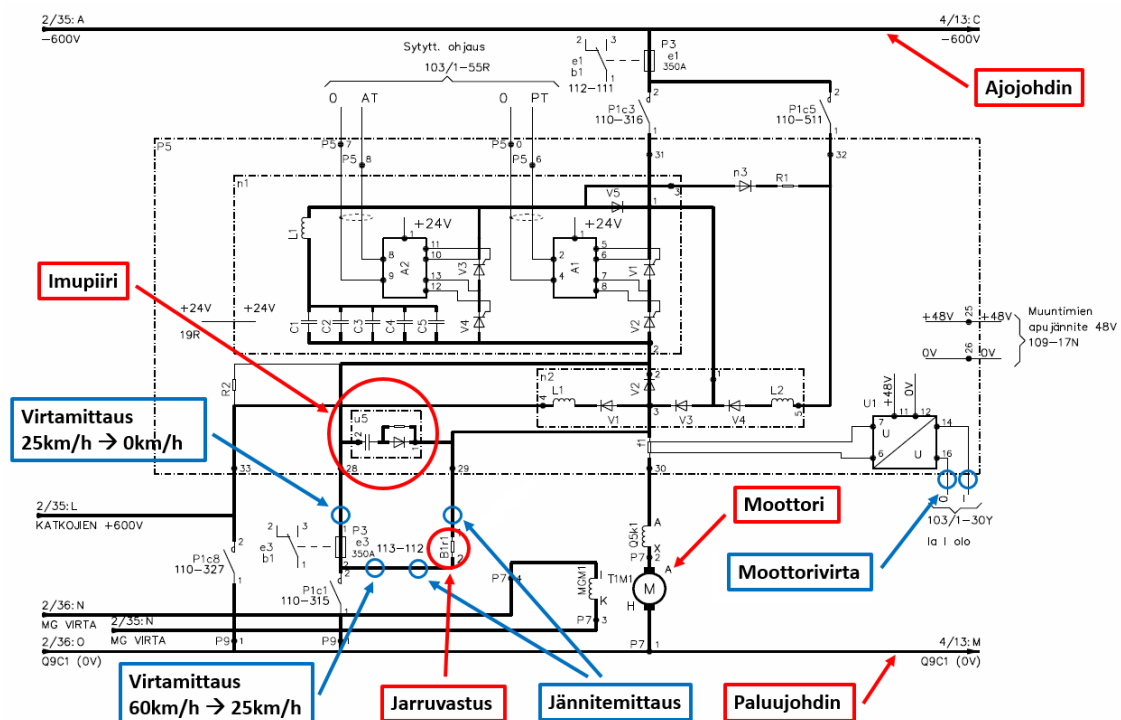
MLNRV-vaunutyyppi valikoitui mittauskohteeksi, sillä nivelraitiovaunuja on määrällisesti eniten HKL:n raitiovaunuista ja vaunutyyppillä on käyttöikää jäljellä vielä parikymmentä vuotta. Lisäksi juuri MLNRV I -vaunuihin on peruskorjausten yhteydessä asennettu uudet lämmityksen ja jäähdityksen ohjauslaitteet ja näiltä laitteilta saadaan helposti säätöpellin asentotieto, joka on tärkeä osa mittauksia. Artic-vaunuissa on uusi järjestelmä jarrutusenergian talteenottoa varten, mutta järjestelmän mittaaminen ei ollut mahdollista tämän työn puitteissa. Variotram-vaunut puolestaan eivät käytä jarrutusenergiaa vaunujen lämmittämiseen, joten kyseinen vaunutyyppi ei soveltunut mittauksiin.

Mittausten tavoitteena oli selvittää kuinka paljon jarrutusenergiaa syntyy sekä kuinka suuri osuus jarrutusenergiasta jää hyödyntämättä. Jarrutusenergian suuruus saatiin mittaamalla jarruvastusten jännitettä ja virtaa. Jarrutusenergian hyödyntämisen osuus puolestaan saatiin mittaamalla säätöpellin asentoa.

5.1 Mittausjärjestelyt

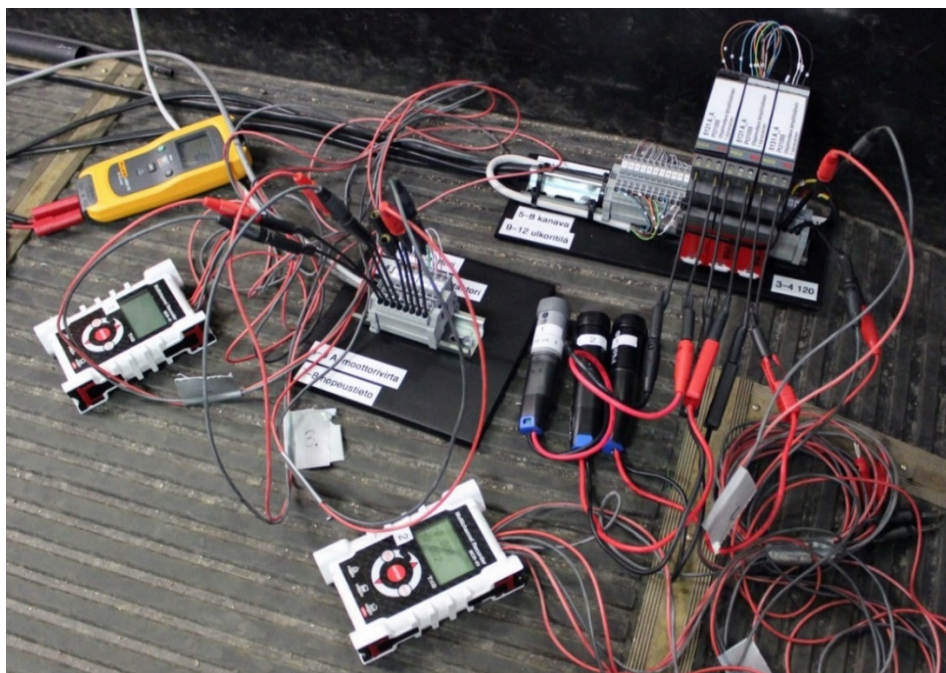
Mittaukset tehtiin 17.3.2015 kello 03.00–04.05, yhteistyössä Helen Oy:n kanssa. Mittausajankohdaksi valittiin normaalin linjaliikenteen ulkopuolinen aika. Lämpötila mittausajankohtana oli 0 °C. Ajettavaksi valittiin linjan 4 reitti Munkkiniemestä Katajanokalle, sillä kyseistä järjestelyä on käytetty aikaisemmin muissa mittauksissa esimerkiksi Artic-vaunuilla ja samaa ajoprofiilia käyttämällä saadaan vertailukelpoisia arvoja. Reitti ajettiin kerran päädyistä päätyyn aloittaen ja lopettaen reitin Töölön hallille. Reitin pituus yhteen suuntaan on 8 kilometriä, joten koko mittausajon matka oli yhteensä 16 kilometriä. Mittausten aikana pysähdyttiin jokaiselle linjan pysäkille ja pysähdyksen aikana avattiin vaunun ovet, jotta saataisiin tuloksiin mukaan ilman vaihtuvuutta, jota normaaliolosuhteissakin tapahtuu. Lisälämpökontaktori oli toiminnassa koko mittausten ajan. Lisälämmön ollessa käytössä saadaan totuudenmukaisemmat arvot säätöpellin aukioloajalle, sillä normaalitilanteessa lisälämmöt ovat toiminnassa ja vaikuttavat matkustamon lämpenemisnopeuteen ja siten säätöpellin asentoon. Mitattavana oli MLNRV I -sarjan vaunu numero 121.

Noin 22 kW:n suuruisten lisälämpövastusten kytkeytymistä päälle ja samalla säätöpellin avautumista ohjaa kolme lämpötilatekijää; ulkolämpötila, vaunun sisälämpötila sekä lämmintä ilmaa vaunuun puhaltavan kanavan lämpötila. Vaunun sisällä oleva termostaatti mittaa vaunun sisälämpötilaa, jonka asetteluarvo on 15–18 °C.



Kuva 5.2 - Virta- ja jännitemittaukset piirikaaviossa. Virta kulkee kokonaisuudessaan jarruvastuksen läpi, kun raitiovaunu jarruttaa yli 25 km/h nopeudesta. Alle 25 km/h nopeudesta jarruttaessa virta alkaa kiertää osittain imupiirin kautta. [15]

Virtojen ja jännitteen mittauspisteet sijaitsevat fyysisesti vaunun alaosissa. Virtapihdit kiinnitettiin mitattaviin johtimiin ja johdot vedettiin vaunun sisään dataloggereille. Kaikki mittaustiedot tuodaan samaan kohtaan vaunussa ja tämän mittaustiedon voi nähdä kuvasta 5.3. Jännitemittausta lukuun ottamatta kaikki mittaustiedot tuodaan riviliittimille, joista ne tallennetaan dataloggereille, joille saadaan tallennettua mittaustiedot koko mittauksen ajalta.



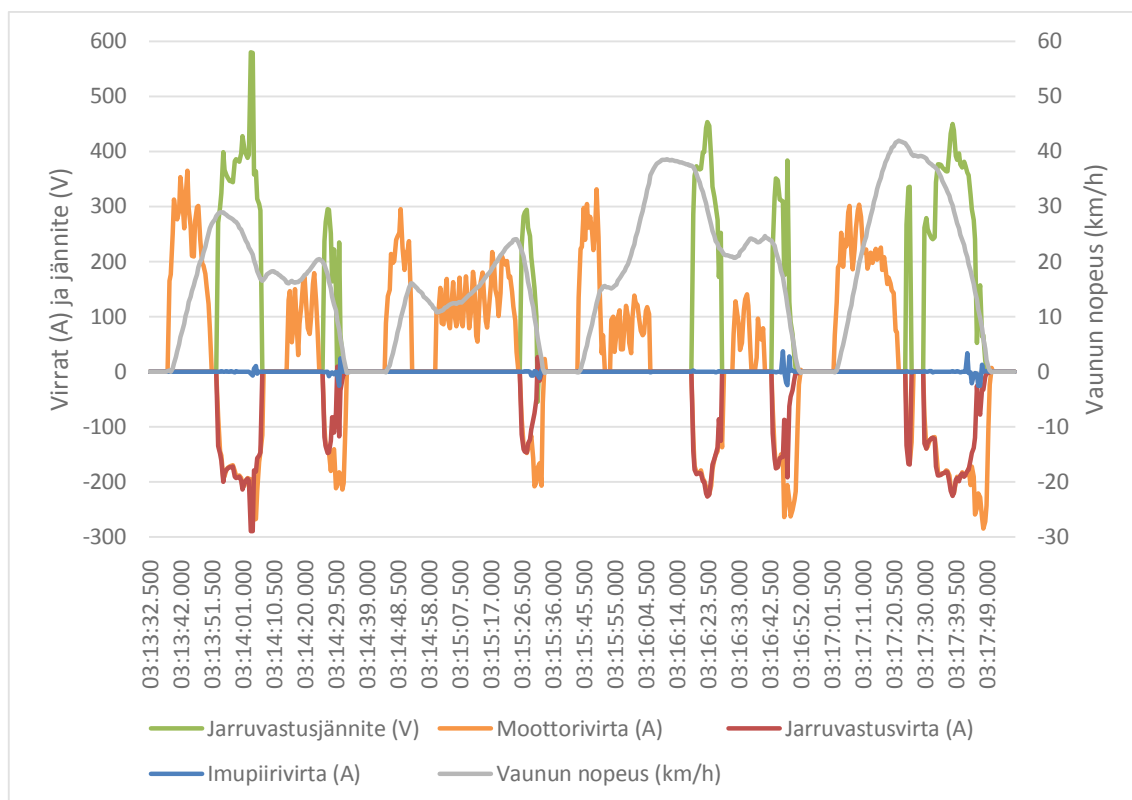
Kuva 5.3 - Mittausjärjestelyjä

5.2 Mittaustulokset

Tässä kappaleessa esitetään edellä esiteltujen mittausten tulokset ja niiden tarkasteluja. Yhdessä MLNRV I-raitiovaunussa on kaksi jarruvastusyksikköä ja ne molemmat sijaitsevat A-vaunussa. Keskimmäistä matalalattiaista C-vaunua puolestaan lämmitetään ainoastaan lisälämpövastuksella, sillä se on kooltaan pienempi, eikä sen katolle mahtuisi jarruvastuksia. Mittaukset tehtiin yhdestä järjestelmästä ja näin ollen kaikki mittausarvot on kerrottu kahdella, jotta saadaan koko vaunua koskevat tulokset jarruvastusjärjestelmien ollessa samanlaiset molemmissa vaunuissa. C-vaunun lisälämpövastus on samanlainen kuin A- ja B-vaunuissa ja tämä on otettu huomioon kokonaislämmöntarvetta laskettaessa.

5.2.1 Jarrutusenergiamittaukset

Otos mittaustuloksista on esitetty kuvassa 5.4. Kuvaajassa virtojen arvot ovat oikeasti päinvastaisia eli negatiiviset arvot positiivisia ja päinvastoin. Käyrät on kuitenkin aseteltu kuvaan näin selkeyden vuoksi. Jarruvastuksen yli olleen jännitteen arvo on laskettu jarrutusvirran ja vastuksen nimellisen resistanssin avulla, sillä jännitemittaukset eivät antaneet täysin oikeita tuloksia.



Kuva 5.4 - Otos virtojen, jännitteen ja nopeuden arvoista.

Jarrutukset näkyvät kuvaajassa jännitteen nousuna. Sama pätee jarruvastusvirtaan, mutta jarrutuksen loppupuolella tulee huomioda imupiirin mukaantulo alle 25 km/h nopeudesta jarruttaessa. Tällöin kaikki jarruvirta ei kulje jarruvastuksen kautta mikä näkyy laskuna jarruvastusvirran arvoissa verrattuna moottorivirtaan.

Jarruvastuksien tuottama energia saadaan laskettua mitatun jarruvastusvirran ja jarruvastuksen resistanssin avulla, jonka nimellisarvo on 2Ω . Virtojen arvot mitattiin puolen sekunnin välein ja näiden arvon perusteella laskettiin hetkelliset tehot wateissa (W) ja energiat wattisekunneissa (Ws). Saadut arvot summattiin koko mittausajalta ja tulokset kerrottiin kahdella, jotta saadaan koko raitiovaunun jarrutusenergia, sillä yhdessä MLNRV I -raitiovaunussa on aina kaksi jarruvastusyksikköä.

$$E_{J1} = 2 * \sum (P_J * t) = 2 * \sum (R_J * I_J^2 * t) = 69265554 \text{ Ws} = 19,240 \text{ kWh} \quad (1)$$

Tulos muunnettiin käyttäen kaavaa (2) vertailtavissa olevaan arvoon mittausajon pituuden ollessa 16 km, jolloin saadaan keskimääräinen jarrutusenergian määrä.

$$E_{J2} = \frac{E_{J1}}{d} = \frac{19,240 \text{ kWh}}{16 \text{ km}} = 1,203 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} \quad (2)$$

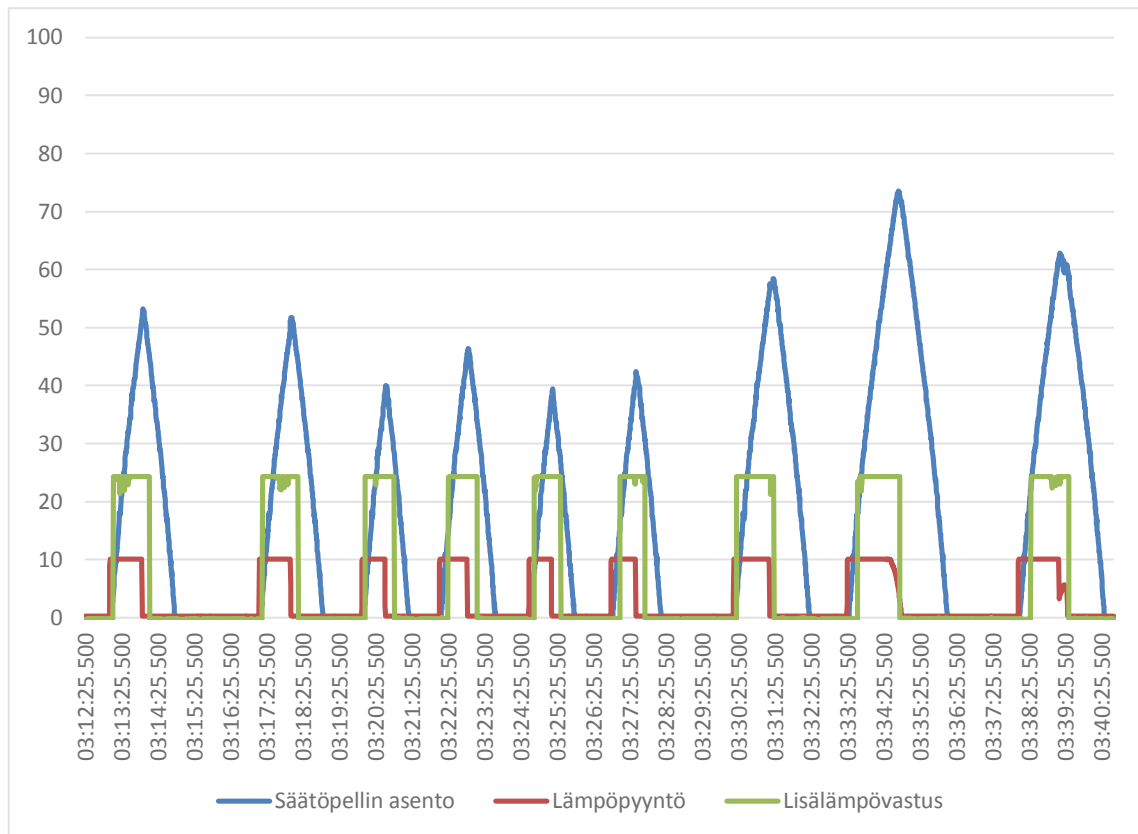
MLNRV-vaunujen kokonaiskulutuksen ollessa keskimäärin 4,65 kWh/km, syntyy jarruvastuksissa energiaa 26 % vaunun ottamasta energiasta. Luku vastaa maailmalla tehtyjä vastaavia tutkimustuloksia, joiden mukaan jarrutusenergiaa voitaisiin saada talteen noin kolmasosa vaunun käyttämästä kokonaisenergiasta. Arvot vaihtelevat järjestelmästä riippuen. Lisää aiheesta kerrotaan kappaleessa 6.1.

Selkeitä jarrutuksia oli mittausmatkalla 57 kappaletta, joten tämän avulla voidaan laskea keskimääräinen arvio yhdestä jarrutuksesta saatavaan energiamäärästä:

$$E_{jarrutus} = \frac{E_{J1}}{57} = \frac{19,240 \text{ kWh}}{57} = 0,338 \text{ kWh} \quad (3)$$

5.2.2 Lämmitysenergian tarve

Kuvassa 5.5 on esitetty otos mittaustuloksista lämmitysenergian tarpeeseen liittyen. Kuvasta nähdään, ettei säätöpelti auennut kertaakaan täysin mittausajankohtana, lämpötilan ollessa 0 °C. Säätöpellin toiminnan ohjaavin tekijä on vaunun sisälämpötila, johon vaikuttaa myös lisälämpövastuksen toiminta. Kuvaajassa säätöpellin asennon käyrä kuvastaa säätöpellin avoimuutta prosenteissa. Kuvaajan kaksi muuta käyrää kertovat lämpöpyynnön ja lisälämpövastuksen päälläoloista; lämpöpyynnön käyrän ollessa 10 V:ssa on lämmönpyyntö päällä ja säätöpelti avautuu, lisälämpövastuksen käyrän ollessa 24 V:ssa lisälämpövastus on päällä.



Kuva 5.5 - Ots säätopellin asennon, lämmön pyynnin ja lisälämpövastuksen mittausarvoista.

Mittausten yhteydessä huomattiin, etteivät lisälämpövastuksen ohjauslogiikat ole optimaalisella tasolla. Tämän voi nähdä kuvasta 5.5. Ideaalisessa tilanteessa lisälämpövastus kytkettäisiin päälle vasta kun säätopelti on täysin avautunut. Nykyisellään järjestelmä kuitenkin kytkee lisälämpövastuksen päälle heti lämpöpyynnön jälkeen, jolloin jarruvastuksilta saatavaa energiaa hyödynnetään vähemmän ja enemmän energiaa otetaan suoraan linjasyötöstä.

Mittausten aikana lisälämpövastus oli päällä lähes kolmasosan ajoajasta. Raitiovaunun kolmen lisälämpövastusten tuottama energia saadaan laskettua, kun tiedetään päälläoloaika sekä vastusten teho:

$$E_{L1} = t_L * P_L = 1062 \text{ s} * (3 * 22 \text{ kW}) = 70092 \text{ kWs} = 19,47 \text{ kWh} . \quad (4)$$

Jotta arvosta saataisiin selkeästi vertailukelpoinen, lasketaan energiankulutus kilometriä kohden:

$$E_{L2} = \frac{E_{L1}}{d} = \frac{19,47 \text{ kWh}}{16 \text{ km}} = 1,217 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} . \quad (5)$$

Jarruvastukset tuottavat energiaa yhteensä 1,203 kWh/km ja mittauksista saadaan laskettua keskimääräinen säätopellin asento, joka oli 16,6 %. Säätopellin lisäksi tilassa on kuitenkin kiinteä ritalä, jonka kautta ulos menee aina osa ilmasta, oli säätopelti auki tai ei. Aukot ovat suunnilleen samankokoiset, mutta ritalän poikkipuista johtuen ilman

oletetaan tässä työssä jakautuvan 40 % ulos ja 60 % sisään säätöpellin ollessa täysin auki. Näin ollen mittausten aikana jarruvastusenergiaa on käytetty lämmitykseen:

$$E_{P2} = E_{J2} * p_P * 60 \% = 1,203 \frac{kWh}{km} * 0,166 * 0,6 = 0,120 \frac{kWh}{km}. \quad (6)$$

Lämmitystarve mittausten aikana saadaan laskettua lisälämpövästuksen tuottaman energian ja säätöpellin läpi päässeän energian avulla:

$$E_{T2} = E_{L2} + E_{P2} = 1,217 \frac{kWh}{km} + 0,120 \frac{kWh}{km} = 1,337 \frac{kWh}{km}. \quad (7)$$

Mikäli säätöpellit olisivat koko ajon aikana täysin auki, olisi lämmitykseen mahdollista saada energiaa:

$$E_{P,max} = 60 \% * E_{J2} = 0,6 * 1,203 \frac{kWh}{km} = 0,722 \frac{kWh}{km}. \quad (8)$$

Tämä arvo jää kuitenkin pienemmäksi kuin kokonaislämmitystarve mittausolosuhteissa, joten näillä järjestelyillä lisälämpövästusta tarvitaan tukemaan lämmitystä 0 °C:n lämpötilassa ja sitä kylmemmissä olosuhteissa. Lisälämpövästuksen käynnistymistä ohjaavaa logiikkaa tulisi kuitenkin säätää, jotta mahdollisimman paljon jarrutusenergiaa käytettäisiin hyödyksi lämmityksessä.

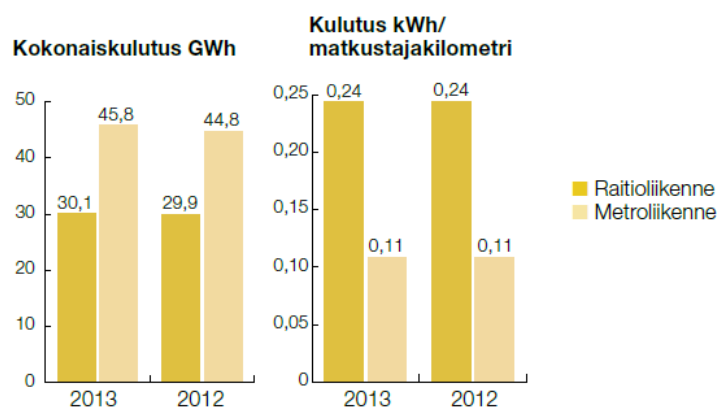
6 Energiankulutus ja -säästömahdollisuudet

Tässä luvussa tarkastellaan raitiovaunu- sekä metrotyyppien energiankulutusta ja -säästömahdollisuuksia. Aluksi kerrotaan lyhyesti kokonaiskulutuksesta, jonka jälkeen keskitytään vaunutyyppikohtaisiin kulutuksiin. Tämän jälkeen kappaleessa 6.2 käsitellään muita energiansäästömahdollisuuksia jarrutusenergian hyötykäytön lisäksi. Kappaleessa 6.3 pohditaan jarrutusenergian eri hyödyntämismahdollisuuksia.

6.1 Energiankulutus

Metro- ja raitiotiejärjestelmien energian kokonaiskulutukset ja kulutukset matkustajakilometriä kohden poikkeavat toisistaan kaluston ja radan teknisten ominaisuuksien eroavaisuuksien takia. Kuvassa 6.1 on vertailtu järjestelmien energiankulutusta. Tulee huomioda, että kokonaiskulutukseen on laskettu mukaan muun muassa vaihdelämmitykset. Lisäksi täytyy muistaa, että energiankulutus vaihtelee jonkin verran vuosittain, johtuen mm. sääoloista, kuljettajien ajotavoista sekä toteutuneista vuoroista.

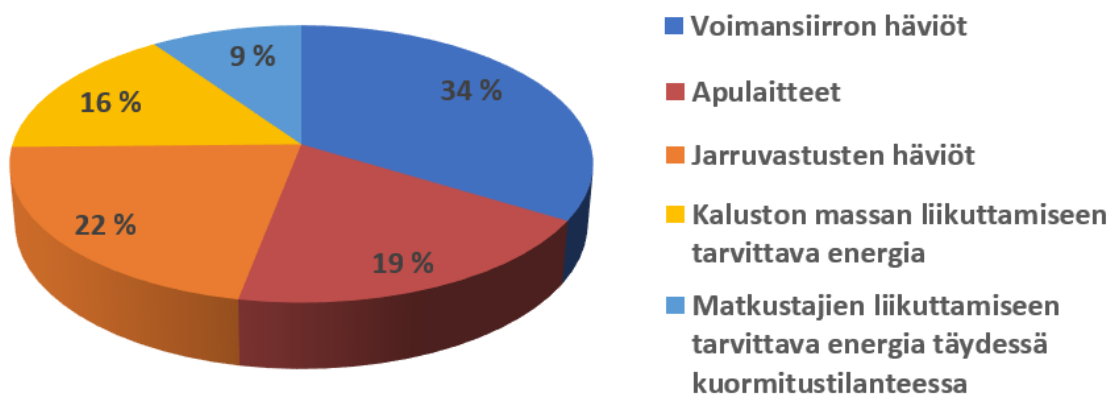
Raitiovaunujen ajoenergian kulutus vuonna 2013 oli yhteensä 28,29 GWh. Tähän lukuun sisältyy kaikki junien itsensä kuluttama energia. Kokonaiskulutus, joka vuonna 2013 oli raitioliikenteellä 30,1 GWh, sisältää myös vaihdelämmitykset sekä sähkönsyöttöasemien kulutuksen. Metron kokonaisenergiankulutus vuonna 2013 oli 45,81 GWh, josta 44,81 GWh on ajoenergiaa ja 1 GWh kuluu vaihdelämmityksiin. [11]



Kuva 6.1 - Raitio- ja metroliikenteen liikennöinnin sähkönkulutus vuosina 2012–2013. [11]

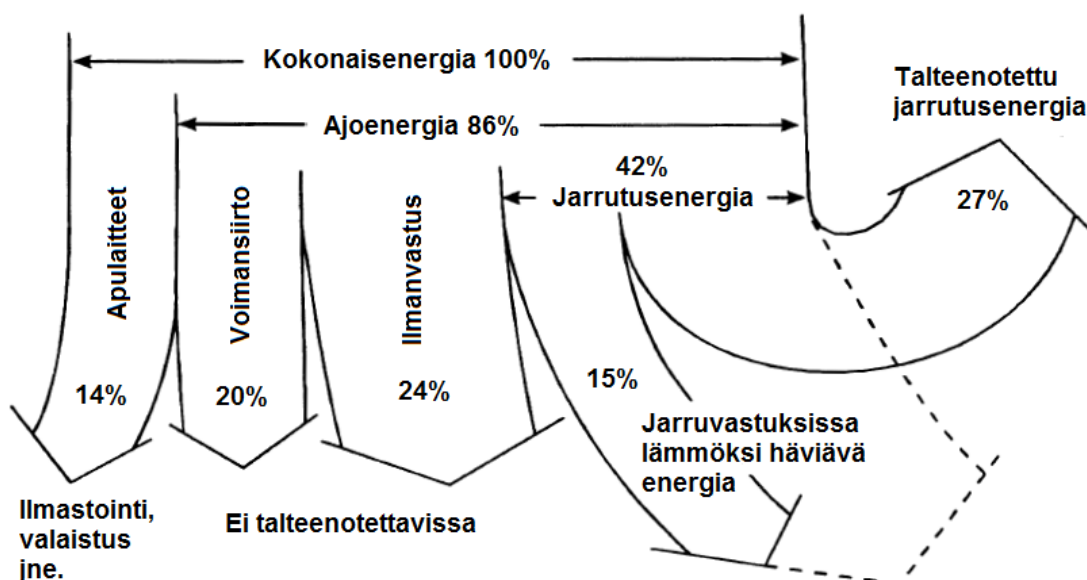
Liikennevälineissä energiaa kuluu muuhunkin kuin vain ainoastaan kaluston liikuttamiseen. Kuvassa 6.2 on esitetty Siemensin arvio raitiovaunun energiankulutuksen jakautumisesta eräässä saksalaisessa pikaraitiotiejärjestelmässä. Osuudet vaihtelevat järjestelmittäin ja toteutuksittain, mutta kaaviota voidaan pitää suuntaa-antavana. Jarruvastusten häviöt kuvastavat jarruvastuksissa hukkalämmöksi muuttuvaa energiaa, joka siis olisi mahdollista käyttää hyödyksi. Kuvan esimerkissä osuus on 22 % raitiovaunun kokonaisenergiasta. Kappaleessa 5 kuvatuissa mittauksissa saatiin HKL:n MLNRV I -raitiovaunun jarrutusenergian määräksi 26 % kokonaisenergiankäytöstä.

Tulokset ovat siis melko yhteneväiset, kun otetaan huomioon kalusto ja järjestelmäkohtaiset erot.



Kuva 6.2 - Raitiovaunun energiankulutuksen jakautuminen Siemensin arvion mukaan eräässä saksalaisessa pikaraitiotiejärjestelmässä. [40]

Kuvassa 6.3 puolestaan on esitetty suuntaa-antavasti metrojunan käyttämän energian jakautuminen Hampurin metrossa. Metrojen ajoprofiili on suoraviivaisempi ja tehokkaampi, johtuen metron kulkemisesta omalla radallaan ilman ylimääräisiä pysähdyksiä. Näin myös jarrutukset ovat tehokkaampia ja niistä saadaan enemmän energiaa talteen. Jarrutusenergiaa syntyy alle puolet ajoenergian kulutuksesta ja sitä on teoreettisesti mahdollista saada talteen noin kolmasosa kokonaisenergiankulutuksesta.



Kuva 6.3 - Arvio metrojunan energiankulutuksen jakautuminen Hampurin metrossa. [41]

6.1.1 Raitioliikenteen energiankulutus

Taulukossa 6 on esitetty HKL:n raitiovaunujen keskimääräiset energiankulutukset vaunutyypeittäin. Taulukosta nähdään kuinka Variotram-vaunut kuluttavat nykyisestä kalustosta selvästi eniten energiaa. Yhtenä syynä suuremmalle energiankulutukselle on, että Variotram ei käytä jarrutusenergiaa matkustamon lämmitykseen vaan ottaa myös kaiken lämmitykseen tarvittavan energian suoraan linjasyötöstä. Sekä MLNRV että Artic käyttävät jarrutusenergiaa lämmitykseen, joskin hieman eri metodeilla. Jarrutusenergian hyödyntämisestä on kerrottu tarkemmin kappaleessa 2.3.

Taulukko 6 - Raitiovaunujen keskimääräinen energiankulutus tyypeittäin. [42]

Vaunutyyppi	Energiankulutus (kWh/km)
Artic	4,35
Variotram	6,19
MLNRV	4,65

6.1.2 Metroliikenteen energiankulutus

Tässä kappaleessa kerrotaan metrovaunujen energiankulutuksesta sekä junista saatavan jarrutusenergian määrästä. Energiankulutuksista puhutaan tässä työssä aina yhtä vaunuparikilometriä (vpkm) kohti. M100- ja M200- junissa vaunupari on pienin mahdollinen yksin liikkuva junayksikkö. M300-juna puolestaan on itsessään yksi kokonaisuudessaan läpikäveltävä yksikkö, joka pituudeltaan vastaa kahta vaunuparia. Koska vpkm on yleisesti käytetty yksikkö metroliikenteessä, samaa yksikköä käytetään myös M300:n yhteydessä vertailtavuuden vuoksi. M300:n valmistajan antamat energiankulutusarvot on siis jaettu kahdella.

M100- ja M200- junien keskimääräinen energiankulutus kilometriä kohden on suunnilleen sama ja saadaan laskettua kokonaisajoenergian ja metron kokonaisliikennesuoritteen eli kuljettujen kilometrien avulla:

$$\text{Keskimääräinen energiankulutus} = \frac{\text{kokonaisajoenergia}}{\text{kokonaisliikennesuorite}} = \frac{44,81 \text{ GWh}}{7,38 \text{ milj. km}} \\ \approx 6,07 \text{ kWh/km}$$

M300-junat on tilattu ja ne ovat vielä valmistusvaiheessa. Ensimmäinen juna tuli koeajoon maaliskuussa 2015. Tässä työssä M300:n energian kulutuksena on käytetty junien valmistajan, espanjalaisen CAF:n, arvioita energian kulumisesta. Valmistaja on antanut muutaman eri skenaarion mukaisia arvioita ja tässä työssä on päädytty käyttämään arviota, jolloin junan keskinopeus olisi 42,2km/h ja apukäytöt ovat täysillä. Arviossa ilmastointia ja lämmitystä ei ole laskettu mukaan apukäyttöihin, vaan niiden keskimääräinen kulutus on arvioitu erikseen. Näillä määrityksillä M300-junan arvioidaan kuluttavan 11,468 kWh/km/juna eli noin 5,73 kWh/km/vp. [43]

Tästä arvosta erillään oli vielä arvioitu lämmityksen ja ilmastoinnin aiheuttamiksi keskimääräisiksi vuotuisiksi kustannuksiksi 75,06 MWh/vuosi/juna eli noin 37,53 MWh/a/vp. Tähän luku kattaa lämmitykseen ja ilmastointiin tarvittavan primäärienergian eli sen energian joka tarvitaan jarrutusenergian hyödyntämisen lisäksi. [43] M300:n liikennesuoritteen Länsimetron ensimmäisen vaiheen valmistuttua arvioidaan olevan 5,723 miljoonaa vaunuparikilometriä [44]. Kahdellakymmenellä junalla eli neljällä-kymmenellä vaunuparilla liikennesuoritteen arvioksi saadaan laskettua 143 075 km/a/vp.

Tästä saadaan yhden junan lämmityksen ja ilmastoinnin energiankulutukseksi noin 0,26 kWh/km/juna eli noin 0,13 kWh/km/vp. Näin ollen M300-junan kokonais-energiankulutuksen arvioksi saadaan 11,73 kWh/km/juna eli noin 5,87 kWh/km/vp.

Vanhatalon diplomityössä mitattiin jarruvastukseen menevää virtaa ja vaunuparin keskimääräiseksi jarrutusenergiaksi saatiin 2,3 kWh/jarrutus/vp [7]. Tämä vastaa noin 1,64 kWh/km/vp, mikäli keskimääräiseksi asemaväliksi oletetaan 1,4 kilometriä. Tulos on saatu jakamalla Länsimetron ensimmäisen vaiheen aikaisen radan pituus asemien määrällä, sillä junat pysähtyvät jokaisella asemalla eivätkä normaalitilanteessa jarruta muulloin kuin asemalle saapuessa.

Kalustojen samankaltaisuuksien vuoksi oletetaan jarrutusenergian määrä suunnilleen samaksi kaikilla kolmella kalustotyyppillä, vaikka Vanhatalon työssä mittaukset tehtiin ainoastaan M100-sarjan junalla. Jarrutusenergian osuus junan ottamasta energiasta on tällä oletuksella M100- ja M200-sarjojen junilla 27 % ja M300-sarjan junilla 28 %.

Kuten kappaleessa 3.3 todettiin, metroissa jarrutusenergia johdetaan jarruvastukseen ja sitä kautta käytetään hyödyksi matkustamon lämmityksessä. Vanhatalon diplomityössä oli tutkittu myös kuinka paljon jarrutusenergiaa käytetään matkustamon lämmitykseen mittaamalla lämmityksen säätöpellin asentoa. Säätöpellillä voidaan jarruvastusten lämmittämä ilma ohjata joko ulos tai matkustamoon. Työn mittaukset tehtiin tammikuussa 2009, jolloin lämpötila on ollut nollan pinnassa. Mittauksella ei siis saatu mallinnettua vuoden kylmimpiä päiviä, jolloin lämmityksen tarve on suurin. Tulokseksi saatiin, että noin 65 % jarruvastuksen lämmittämästä ilmasta ohjattiin matkustamoon. [7]

Tässä yhteydessä tulee huomioda, että Vanhatalon mittausten aikana suunnilleen kolmasosa metrolinjasta kulki tunnelissa, kun taas Länsimetron tullessa käyttöön, koko Länsimetron osa kulkee tunnelissa nostaen reitin tunneliosuutta selvästi. Tunnelin keskilämpötila ympäri vuoden on noin 10 °C [7]. Täten lämmitystä tarvitaan lähinnä ulko-osuuksilla, joten sitä käytettäneen siis Länsimetron käyttöönoton jälkeen yhä vähemmän.

Taulukossa 7 on esitetty yhteenveto metrovaunujen energiankulutuksesta tyypeittäin. Kaikki metrovaunutyyppit siis kuluttavat suunnilleen saman verran energiaa, joskin M300-vaunutyyppin energiankulutuskulu on toistaiseksi ainoastaan valmistajan arvio.

Taulukko 7 - Metrovaunujen keskimääräinen energiankulutus tyypeittäin.

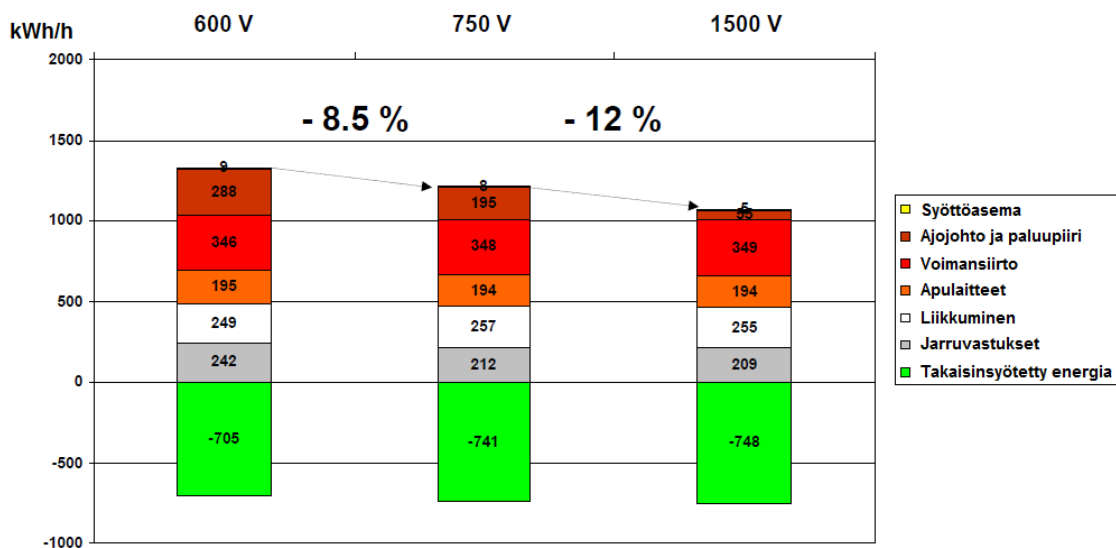
Vaunutyyppi	Energiankulutus (kWh/km/vp)
M100	6,07
M200	6,07
M300	5,87

6.2 Energiansäästömahdollisuudet

Raideliikenteessä on myös muita energiansäästömahdollisuuksia ja -tapoja kuin ainoastaan jarrutusenergian talteenotto ja sen hyödyntäminen. Sekä metro- että raitiovaunuliikenteessä kuljettajien ajotapakoulutus auttaa säästämään energiaa. Raitiovaunuilla jännitteen nosto ja liikenteen optimointi säästävät energiaa. Metroliikenteessä puolestaan automatisoinnilla voidaan saavuttaa energiasäästöjä.

Raitiovaunuilla jännitteen nostaminen 600 V:sta maailmalla nykyisin yleisemmin käytettyyn 750 V:iin pienentäisi ajojohtohäviöitä sekä parantaisi jarrutusenergian talteenoton hyötysuhdetta. Jännitteen nosto 600 V:sta 750V:iin ei ole mahdolloman suuri ja sitä harkitaan myös Helsingin raitiovaunujärjestelmässä vanhimpien, 750 V:n nimellijännitettä kestävämmien laitteistojen poistuttua käytöstä. 1500 V:n järjestelmiä on myös yleisesti käytössä, mutta nimellijännite on kaksinkertainen 750 V:iin verrattuna ja aiheuttaa selvästi suurempia kustannuksia järjestelmien hankinnassa varsinkin suojauspuolella.

Kuvassa 6.4 on esitetty Siemensin arvio jännitteennoston vaikutuksista energiankulutukseen eräässä saksalaisessa järjestelmässä. Kyseessä on kahden linjan pikaraitiotiejärjestelmä, jossa koko syöttöverkko on yhteen kytketty. Näin ollen kuvan vihreät palkit kuvastavat syöttöverkkoon takaisinsyötettyä energiaa, jonka muut vaunut voivat käyttää kiihdytykseen. Tuloksia ei voida suoraan vertailla HKL:n järjestelmiin, sillä HKL:n syöttöverkko on jaettu useisiin erotettuihin syöttöjaksoihin, mutta tuloksia voidaan käyttää suuntaa-antavasti. [40]



Kuva 6.4 - Arvio jännitteennoston vaikutuksesta energiankulutukseen raitiovaunuliikenteessä, jossa on yhtenäinen syöttöverkko ilman erillisiä syöttöjaksia. [40]

Raitiovaunuliikenteessä liikennöinnin nopeuttaminen ja sujuvoittaminen on myös tehokas tapa vähentää energiankulutusta. Ylimääräiset jarrutukset ja kiihdytykset kuluttavat kalustoa, rataa sekä energiaa. Lisäksi jarrutukset alle 25 km/h nopeudesta eivät tuota jarrutusenergiaa tehokkaasti, vaan osa häviää imupiiriin, kuten kappaleessa 5.1

todettiin. Kaikkea jarrutusenergiaa ei myöskään koskaan voida täysin hyödyntää, joten liikennöinnin optimointi on tärkeä tekijä energiansäästöissä.

Raitiovaunuliikenne kulkee kaduilla tavallisen liikenteen seassa, joskin Helsingissä osin omalla kaistallaan. Risteävä liikenne ja liikennevalot kuitenkin hidastavat raitiovaunun kulkua, jolloin usein ei voida kulkea täydellä nopeudella ja pysähtelemään joudutaan melko usein. Liikenteen optimointi ja sen sujuvuus onkin siksi tärkeää raitiovaunuliikenteessä. Helsingissä raitiovaunuille onkin asetettu etuajo-oikeuksia liikennevaloissa sekä tehty muita liikennettä sujuvoittavia järjestelyitä. Muun liikenteen aiheuttamien pysähdysten lisäksi lyhyet pysäkkivälit aiheuttavat, ettei raitiovaunu välttämättä ehdi kiihdyttämään täyteen nopeuteen tai joutuu siitä heti pudottamaan vauhdin alas jarruttaakseen pysäkillä. Vaunulla ajaminen olisi tehokkaampaa, mikäli ne voisivat ajaa metron tapaan täysin omalla linjallaan, joka ei risteäisi muun liikenteen tai suojateiden kanssa, ja jonka pysäkkivälit olisivat riittävät. Nykyisin Helsingin raitiotieverkoston pysäkkiväli on keskimäärin 350 metriä [5], mutta esimerkiksi Tampereelle suunnitellussa raitiotiejärjestelmässä keskimääräinen pysäkkiväli on 600 metriä [45]. Kaluston liikkeelle saamiseen tarvittava energia on suurempi kuin sen nopeuden ylläpitämiseen tarvittava ja näin ollen jokainen pysähdys sekä hidastaa matkaa että kuluttaa enemmän energiaa.

Metron automatisointi toisi energiasäästöjä, kun junat voitaisiin ohjelmoida kiihdyttämään ja jarruttamaan tehokkaimman periaatteen mukaisesti. Samalla myös ajojen kuljettajakohdaiset erot poistuisivat. Lisäksi junien saapumiset ja lähtemiset metrolaitureilta voitaisiin ajoittaa siten, että toisen junan jarruttaessa asemalle, toinen kiihdyttäisi lähtöön samaan aikaan. Tällöin kiihdyttävä juna voisi hyödyntää jarruttavan junan jarrutusenergiaa kiihdytykseensä. Tällainen ajoittaminen on kuitenkin hankalaa, sillä asemien etäisyydet vaihtelevat. Junien ajoitus voitaisiin kuitenkin mahdollisesti saada joillain asemista yhteneviksi.

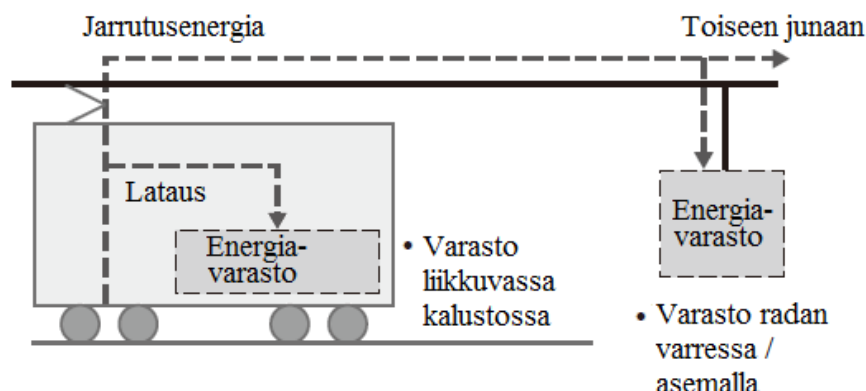
Sekä metroilla että raitiovaunuilla energiankulutukseen voidaan vaikuttaa kuljettajien ajotapakoulutuksella. Henkilökohtaisia eroja tulee aina olemaan, mutta koulutuksella voidaan päästä lähemmäs energiatehokkainta ajotapaa. Täysin ideaalinen ajotapa kuitenkin hidastaisi matkantekoa huomattavasti, joten on tärkeää löytää sopiva välimuoto ekologisen ja sujuvan ajotavan välillä.

6.3 Jarrutusenergian hyödyntämismahdollisuudet

Tässä kappaleessa kuvataan jarrutusenergian hyödyntämismahdollisuuksia tulevaisuudessa HKL:n kalustolla ja infralla. Jarrutusenergian hyödyntämistä tällä hetkellä on kuvattu kappaleessa 5.1.

Sekä raitiovaunuissa että metroissa jarrutusenergiaa on teoreettisesti mahdollista hyödyntää samojen periaatteiden mukaisesti. Näitä mahdollisuuksia on havainnollistettu kuvassa 6.5. Jarrutusenergiaa voidaan käyttää hyödyksi junan itsensä tarpeisiin esimerkiksi apukäyttöihin ja lämmitykseen tai jarrutusenergiaa voidaan syöttää syöttöverkkoon ja sitä kautta toisten junien käyttöön. Energiaa voidaan myös säilöä

energiavarastoihin, joista sitä saadaan tehokkaammin käytettyä esimerkiksi junien kiihdytykseen. Energiavarastot voivat sijaita joko liikkuvassa kalustossa, radan varressa tai syöttöasemalla.

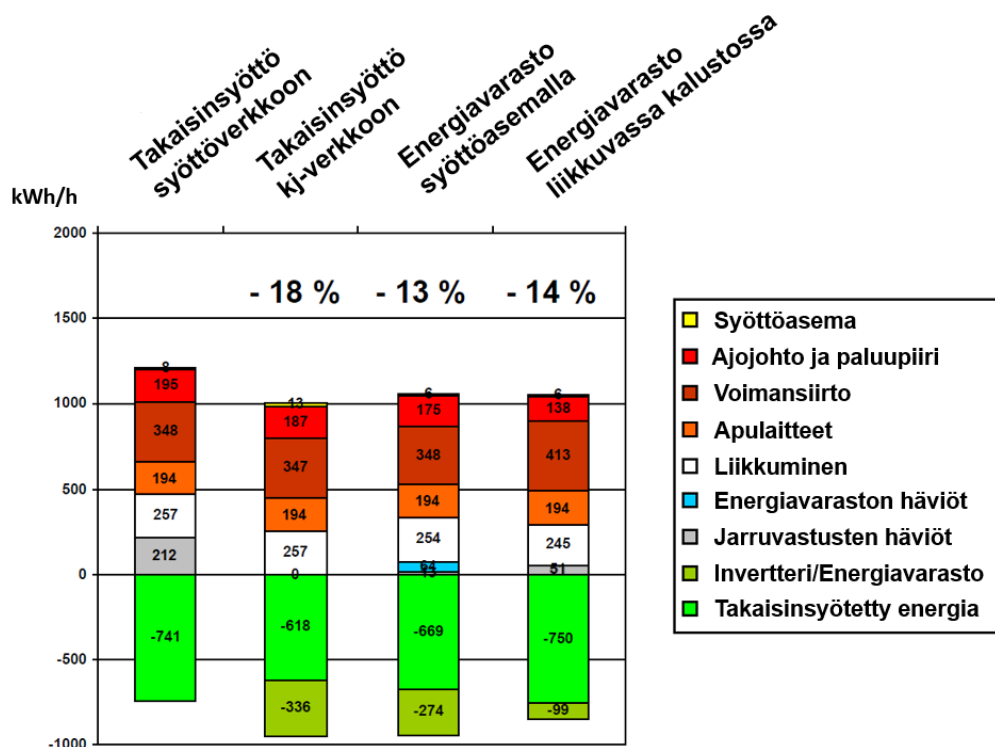


Kuva 6.5 - Jarrutusenergian hyödyntämismahdollisuuksia. [46]

Energiavaraston sijoitus liikkuvaan kalustoon olisi suoraviivainen ratkaisu, sillä tällöin vaunu voisi käyttää energiaa suoraan omiin kiihdytyksiinsä, eikä verkosta aiheutuisi siirtohäviöitä. Tällainen ratkaisu kuitenkin vaatisi kalustolta erikseen varattua tilaa energiavarastolle ja se lisäisi vaunun painoa. Painon lisääntyessä vaunu tarvitsee enemmän energiaa kiihdytyksiin ja jarrutuksiin. Lisäksi investointikustannukset olisivat melko korkeat olettaen, että jokaiseen vaunuun hankittaisiin oma energiavarasto. Tosin liikkuvaan kalustoon sijoitettava energiavarasto voi olla kooltaan sähköasemalle sijoitettavaa pienempi ja siten se ei paina yhtä paljon ja sen investointikustannukset yksittäisen laitteen osalta ovat pienemmät.

Energiavarasto voi sijaita myös radan varressa tai sähkönsyöttöasemalla. Haittapuolena näissä ratkaisuissa ovat edellä mainitut siirtohäviöt. Varaston sijaitessa syöttöasemalla, se voitaisiin kytkeä esimerkiksi suoraan syöttökiskoon, jolloin se voisi varastoida useamman syöttöjakson energiaa. Tällöin käyttöön tarvittaisiin hieman suurempi energiavarasto, mutta varastoja tarvittaisiin vähemmän ja ne olisivat tehokkaammassa käytössä. Radanvarressa tai syöttöasemalla sijaitseva energiavarasto voisi myös auttaa verkon teknisellä puolella, kuten esimerkiksi syöttöverkon jännitteen tasaamisessa. Syöttöverkon jännite voi tarvita tukemista esimerkiksi linjan päässä, mikäli lähin syöttöasema on suhteellisen kaukana.

Kuvassa 6.6 on esitetty Siemensin arvio energiavarastojen ja keskijänniteverkon takaisinsyötön vaikutuksesta energiankulutukseen eräässä saksalaisessa järjestelmässä. Kyseessä on kahden linjan pikaraitiotiejärjestelmä, jossa koko syöttöverkko on yhtenäinen eli sitä ei ole jaettu syöttöjaksoihin. Näin kytketyssä verkossa raitiovaunut voivat paremmin käyttää hyödyksi toisten raitiovaunujen syöttöverkkoon syöttämää energiaa. Kuvasta voidaan huomata, etteivät keskijänniteverkon takaisinsyötön hyödyt ole kovin paljoa energiavarastoja suurempia ja että energiavaraston sijainnilla ei kyseisessä tapauksessa energiasäästön kannalta ole juurikaan väliä. [40]



Kuva 6.6 – Siemensin esittämä arvio energiavarastojen vaikutuksesta energiankulutukseen pikaraitiovaunujärjestelmässä, jossa on yhtenäinen syöttöverkko. [40]

6.3.1 Raitioliikenne

Variotram- ja Artic-vaunut pystyvät syöttämään jarrutusenergiaa takaisin ajojohtoon. Vuonna 2008 arvioitiin, että raitiotieverkossa, monine risteävine linjoinen, on edullisinta käyttää jarrutusenergian verkkoon takaisinsyöttöä, koska energiaa vastaanottamassa on useimmiten toisia vaunuja. [28] Syöttöjaksot kuitenkin jakavat raitiovaunun ajojohtoverkoston useisiin osiin, ja todennäköisyys, että samalla jaksolla olisi samaan aikaan vaunu kiihdyttämässä ja toinen jarruttamassa, on epätodennäköistä. Tästä syystä jarrutusenergian takaisinsyötön ajoverkkoon ei tulisi olla ainoa keino jarrutusenergian hyödyntämiselle, sillä suuri osa energiasta menee tällöin täysin hukkaan, kuten Variotram-vaunuissa tällä hetkellä käy. Kuitenkin optio takaisinsyötölle on kannattavaa olla olemassa, sillä se ei vaadi kalustolta paljoa.

Verkon kytkentätavan muutos ratkaisisi ongelman jarrutusenergian takaisinsyötöstä syöttöverkkoon. Tämä tarkoittaisi sitä, että syöttöjaksoista luovuttaisiin ja muodostettaisiin yksi yhtenäinen syöttöverkko. Yhtenäisen syöttöverkon tapauksessa yksittäisellä syöttöasemalla tapahtuva vika ei vielä aiheuttaisi ongelmia syöttöverkolle muiden syöttöasemien pystyessä korvaamaan vikaantuneen aseman syöttö. Toisaalta itse syöttöverkossa aiheutuva vika, esimerkiksi ajolangan katkeaminen, vaikuttaisi puolestaan laajemmalla alueella kuin nykyisin. Yhtenäiseen syöttöverkkoon siirtyminen edellyttäisi myös verkon suojausperiaatteiden muuttamista. Sillä saataisiin paremmin hyödynnettyä kahden uusimman vaunutyyppin, Variotram- ja Artic-vaunujen, jarrutusenergian takaisinsyöttöominaisuutta, kun verkosta löytyisi enemmän vastaanottavaa kalustoa.

Tulisi tutkia olisiko ratkaisu mahdollinen vai alentaisiko muutos verkon toimintavarmuutta liian paljon.

Ajatukseltaan yksinkertainen ratkaisu jarrutusenergian hyödyntämiselle olisi käyttää energia vaunun omiin energiantarpeisiin suoraan, ilman sähköistä energiavarastoa, eli toisin sanoen käytännöllisintä olisi käyttää energia vaunun apukäyttöihin. Lämmitys on yksi apukäytöistä ja NRV-, MLNRV- ja Artic-vaunuissa jarrutusenergiaa käytetäänkin vaunun lämmittämiseen. Jarrutuksen tehot ovat kuitenkin hetkittäisiä ja apukäytön tarpeet pääasiassa jatkuvia. Näin ollen jarrutusenergian hyödyntämiseen tarvitaan jokin välillinen laite, joka NRV-vaunuissa on jarruvastus ja Articissa vesivaraaja. Näiden laitteiden toimintaperiaatteet on kuvattu kappaleessa 3.3.

Liikkuvaan kalustoon voidaan sijoittaa energiavarasto ja uusissa Artic-vaunuissa tähän mahdollisuuteen on jo varauduttu. Liikkuvaan kalustoon sijoitettuna energiavarasto lisää myös kaluston massaa, vaikka varasto voikin olla pienempi kuin sähköasemalle sijoitettu.

Energiavarasto voisi raitiovaunujärjestelmässä sijaita sekä radan varressa että sähkönsyöttöasemalla. Varaston sijaitessa syöttöasemalla, se voitaisiin kytkeä esimerkiksi suoraan syöttökiskoon, jolloin se voisi varastoida useamman syöttöjakson energiaa. Energiavarastoiden sijoitus vaatii kuitenkin tilaa, jota suurimmalla osalla HKL:n raitioliikenteen syöttöasemista ei tällä hetkellä ole.

Raitiovaunujärjestelmässä energiavarasto voisi sijaita myös radan varressa erillisenä yksikkönään. Tämä mahdollistaisi laitteen sijoittamisen lähelle rataa, jolloin siirtohäviöt pienenisivät verrattuna syöttöasemalle sijoitettavaan energiavarastoon ja tarvittavien laitteiden määrä olisi pienempi kuin tilanteessa, jossa jokaisessa vaunussa olisi oma energiavarastonsa. Investointikustannusten vertailu ei kuitenkaan ole täysin suoraviivaista, sillä esimerkiksi sähkönsyöttöasemalla sijaitseva energiavarasto sijaitsisi sisätiloissa, kun taas radan varressa sijaitseva olisi omillaan ja tarvitsisi säätä vastaan koteloinnit ja järjestelyt. Lisäksi energiavarastojen sijoitus vilkkaimmin liikennöidyillä keskusta-alueilla ja siten parhailla energian talteenotto- ja hyödyntämispaikoilla, voisi olla hankalaa. Laite vaatii jonkin verran tilaa, eikä sitä voi sijoittaa mielivaltaisesti mihin vain.

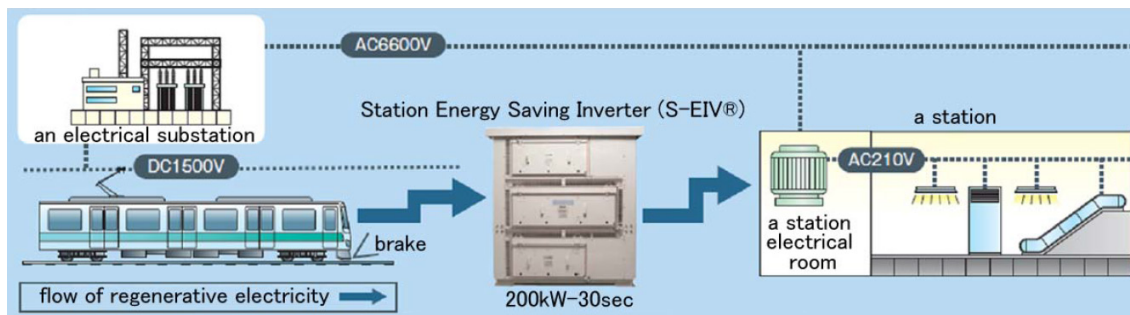
6.3.2 Metroliikenne

Energiavaraston sijoittamiseen liikkuvaan kalustoon käyvät pääasiassa samat perustelut kuin raitiovaunuilla kappaleessa 6.3.1. Metroissa energiavaraston sijoittaminen liikkuvaan kalustoon ei kuitenkaan onnistu, sillä metroratojen sillat eivät kestäisi junien suurempaa akselipainoa. Sillat on aikoinaan mitoitettu oletuksella, että junat kevenevät tulevaisuudessa, mutta todellisuudessa kehitys on ollut päinvastainen. Näin ollen uusissa M300-junissakaan ei ole varauduttu energiavaraston sijoitukseen itse metrojunaan. Mikäli tulevaisuudessa metrojunien akselipaino pienenee selkeästi tai siltoja vahvistetaan, voitaneen energiavaraston sijoitusta junaan harkita.

Energiavarasto voitaisiin sijoittaa myös radan varteen omaan yksikköönsä tai sähkönsyöttöasemalle. Radan varteen sijoitettava energiavarasto ei ole perusteltu

metrolla, sillä normaalissa ajotilanteessa junat jarruttavat ainoastaan asemille saapuessaan. Energiavarasto olisikin siis järkevämpää sijoittaa sähkönsyöttöasemalle tai vaihtoehtoisesti metroaseman yhteyteen, jolloin varastoitua energiaa voitaisiin käyttää myös aseman sähkötarpeisiin.

Kuvassa 6.7 on esitetty yksi mahdollinen ratkaisu jarrutusenergian hyötykäyttöön. Metrojärjestelmässä jarrutusenergiaa voitaisiin käyttää aseman omakäyttöön, eli esimerkiksi valaistukseen ja liukuportaisiin. Tällöin ei tarvitsisi huolehtia energiavaraston kapasiteetin mahdollisesta ylittymisestä.



Kuva 6.7 - Jarrutusenergiaa voidaan hyödyntää myös metroaseman omakäyttöön, muun muassa valaistukseen ja liukuportaiden toimintaan. [47]

HKL:n metroasemien liukuportaat hyödyntävät jo jarrutusenergiaa omalta osaltaan. Alaspäin meneviä liukuportaita jarrutetaan kun portaissa on tarpeeksi suuri kuorma ja energiaa käytetään hyödyksi ylöspäin rullaavissa portaissa. Vuonna 2013 tehdyissä energiamittauksissa Hakaniemessä todettiin, että toistaiseksi regeneroitu energiamäärä on pieni, mutta sen potentiaali on suuri, sillä jo 10 %:n kuormitusasteella portaiden rullausta joudutaan hidastamaan ja tästä syntynyttä energiaa voidaan käyttää hyödyksi. [48]

Metrolla jarrutusenergian takaisinsyöttäminen syöttöverkkoon on estetty vaunuissa olevilla diodeilla. Lisäksi nykyisin metrojärjestelmässä eri raiteiden virtakiskot ovat yhteydessä toisiinsa vain sähkönsyöttöaseman kautta eli jotta eri raiteilla kulkevat metrojunat voisivat hyödyntää toistensa jarrutusenergiaa, tulee energian ensin joka tapauksessa kulkea syöttöaseman kautta.

Metrossa 10 kV:n tai 20 kV:n keskijänniteverkkoon takaisinsyöttäminen tulee jatkossakin olemaan hankalaa järjestelmän kaksisuuntaisen syötön takia, kuten luvussa 4.3 kerrottiin. Jarrutusenergian takaisinsyötön mahdollistamiseksi metroverkon sähkönsyöttöön pitäisi tehdä muutoksia, mutta kaksisuuntaisesta sähkönsyötöstä ei haluta luopua sen tuoman paremman toimintavarmuuden takia.

Uusissa M300-junissa ja ilmastoinneilla varustetuissa raitiovaunuissa käytetään ilmalämpöpumppujärjestelmää junan jäähdytykseen, joten voisi selvittää, voisiko niitä käyttää myös lämmitykseen. Ilmalämpöpumpuilla saadaan tuotettua lämpöä tehokkaammin kuin sähkölämmityksellä. Esimerkiksi jos ilmalämpöpumpun suorituskerroin on 5, se tarkoittaa, että pumppu pystyy 1 kWh energialla tuottamaan yli 5 kWh lämpöä. Suoritekerroin laskee lämpötilan mukana, mutta pumpuista voitaisiin saada tehokkaammin hyödynnettyä jarrutusenergiaa.

7 Kannattavuuden arviointi

Tässä luvussa verrataan energian säästöpotentiaalia ja niistä aiheutuvia kustannuksia sekä raitiovaunuille että metroille. Kannattavuuden arvioinnissa on käytetty herkkyyss-tarkasteluja sekä erilaisia skenaarioita. Lisäksi lasketaan energian säästökustannusten pohjalta kannattavuuden raja mahdolliselle investoinnille.

7.1 Nykyiset energiakustannukset

Kustannusten suurimmat yksittäiset tekijät ovat energiankulutus ja sähkön hinta. Sähkön hinta muodostuu pohjoismaisilla energiamarkkinoilla päivä- ja tuntihintojen mukaan. Raitiovaunu- ja metrojärjestelmien sähkö on sertifioitua uusiutuvaa tuuli- ja vesivoimaa, sillä Helsingin kaupungin keskeisin ympäristöpolitiikan tavoite on olla hiilineutraali kaupunki vuoteen 2050 mennessä. Uusiutuvaa energiaa käytetään raideliikenteen lisäksi myös HKL:n kiinteistöissä. Lisäkustannukset 115 GWh:n vuosikulutuksella ovat arviolta noin 60–90 000 euroa. Lopullinen hinta määräytyy tunneittain vaihtuen sähkön spot-markkinoilta. [49]

Raideliikenteen käyttämä sähkö on verotonta. Laissa sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta on sen seitsemännessä pykälässä todettu, että ”valmisteverotonta ja huoltovarmuusmaksutonta on sähkö”, ”joka toimitetaan sähköisen raideliikenteen välittömään käyttöön”. Laki on säädetty alun perin vuonna 1996 ja sähköistä raideliikennettä koskeva kohta on lisätty vuonna 1997. [50] HKL:n ja Helsingin Energian välinen sopimus asiasta on puolestaan tehty vuonna 1999.

Sähkön hinta on pysynyt melko vakaana viime vuosina, mutta tämän työn kannattavuuslaskelmissa on otettu mukaan skenaarioita, joissa sähkön hinnan odotetaan kohoavan merkittävästi. Sähkön hinnan kehitystä on vaikea arvioida pitkällä tähtäimellä, joten erilaisia mahdollisuuksia on hyvä ottaa huomioon.

7.2 Taloudellinen kannattavuus

Sekä raitio- että metroliikenteen liikennesuorite ja siten myös energiankulutus tulee kasvamaan selvästi vuoteen 2025 mennessä. Lukuarvot on esitetty taulukossa 8. Vuoden 2025 arvot ovat arvioita ja siten ainoastaan suuntaa-antavia. Varsinkin raitioliikenteen tulevaisuuden energiankulutus riippuu vahvasti rataverkon kehityksestä ja aikataulusta. Tämä arvio on tehty metroliikenteen osalta Länsimetron ensimmäisen osan liikennöinti- arvioiden [44] pohjalta ja raitiovaunuliikenteen osalta raitioliikenneyksen pitkän tähtäimen suunnitelman [10] mukaisten liikennöinti- arvioiden pohjalta.

Taulukko 8 - Raitio- ja metroliikenteen energiankulutuksia.

	2015	2017 (arvio)	2025 (arvio)
Raitioliikenne	28,29 GWh	29,37 GWh	37,54 GWh
Metroliikenne	44,81 GWh	77,79 GWh	ei arviota

Raitio- ja metrol liikenteen energiankulutuksen kehitykseen vaikuttaa monta tekijää, joista selkein lienee kaluston energiankulutus. Nykyisen kaluston kulutukset on esitetty luvussa 6.1. Näin ollen eli vaunumalleilla ajettavat kilometrimäärät vaikuttavat kokonaisenergiankulutukseen samoin kuin kokonaisliikenteen määrä. Lisäksi energiankulutukseen vaikuttavat, otetaanko jarrutusenergiaa talteen ja tapahtuuko talteenotto vaunussa vai esimerkiksi syöttöasemalla.

Taulukossa 9 on esitetty teknisiä ratkaisut, joilla voidaan kullakin päästä arviolta 10 %:n energiasäästöön. Jotta saavutettaisiin 30 % energiasäästö, olisi toteutettava kaikki kolme taulukossa mainittua toimenpidettä. Kyseiset toimenpiteet ja säästöpotentiaalit ovat arvioita eikä toimenpiteiden vaikutusta HKL:n järjestelmissä ole simuloitu tai laskettu tarkasti.

Taulukossa 9 energiavarastojen sijoittaminen joka toiselle sähköasemalle toisi arviolta 10 % energiasäästöä. Jarrutusenergiamittausten tulokseksi saatiin, että hyödynnettävää jarrutusenergiaa saadaan noin 26 % raitiovaunun ottamasta energiasta. Suunnilleen puolet tästä energiasta voidaan käyttää vaunun lämmittämiseen ja loput 13 % voitaisiin syöttää esimerkiksi syöttöasemalla sijaitsevalle energiavarastolle. Kun tähän otetaan huomioon muun muassa siirtohäviöt, saadaan säästöpotentiaalin arvioksi 10 %. HKL:n syöttöverkko on pääosin kaksipuoleisesti syötetty, joten riittää, että energiavarastot sijoitetaan joka toiselle syöttöasemalle.

Taulukko 9 - Tekniset ratkaisut eri säästöpotentiaalien saavuttamiseksi.

Säästöpotentiaali	Raitioliikenne	Metrol liikenne
10 %	Liikenteen, ajotapojen ja pysäkkivälien optimointi	Ajotapojen ja pysäkkivälien optimointi
10 % (yht. 20 %)	Energiavarastot joka toiselle syöttöasemalle	Energiavarastot joka toiselle syöttöasemalle
10 % (yht. 30 %)	Jännitteen nosto 600 V:sta 750 V:iin	Jännitteen nosto 750 V:sta 1500 V:iin

Tässä työssä haluttiin selvittää ja laskea vuotuisten säästöjen perusteella mahdollisen investoinnin kannattava suuruus. Näin ollen ensiksi laskettiin määriteltujen säästöpotentiaalitasojen mukaiset energiamäärät. Tulokset on esitetty taulukossa 10 sekä raitio- että metrol iikenteelle. Investoinnin kannattavuutta laskettaessa muuttuvina tekijöinä on käytetty sekä energian hintaa että investoinnin poistoaikaa. Jotta investointi olisi kannattava, tulee investoinnin poistoajan aikaisten säästöjen ylittää investoinnin suuruus. Näin ollen taulukoissa 11 ja 12 esitettyjen raitiovaunu- ja metrol iijärjestelmien laskutulokset on käsiteltävä mahdollisten investointien maksimiarvoina.

Taulukko 10 - Säästöpotentiaalit energiamäärinä.

	Säästetyn energian määrä vuosittain (GWh)	
Säästöpotentiaali	Raitioliikenne	Metrol iikenne
10 %	2,829	4,481
20 %	5,658	8,962
30 %	8,487	13,443

Säästöpotentiaalin ja energian hinnan avulla on saatu laskettua vuotuinen säästö ja investoinnin poistoajan vaikutus on huomioitu nettonykyarvon avulla. Nettonykyarvon laskemiseksi käytettiin seuraavaa kaavaa

$$\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{(1+r)^i} \quad (9)$$

jossa n on investoinnin poisto aika vuosina, r korkokanta ja x investoinnista saatava hyöty vuodessa euroina. Korkokannan arvona on käytetty 4 %:a.

Kaavan (2) perusteella lasketut kannattavien investointien enimmäisarvot on esitetty raitiovaunujärjestelmälle taulukossa 11 ja metrojärjestelmälle taulukossa 12. Energian hinnan on tällä hetkellä noin 0,05 €/kWh eli taulukoiden varioinneissa on käytetty suuria energian hinnan muutoksia, jotta lukuihin saadaan näkyvämpiä eroja. Esimerkiksi energian hinnan kolminkertaistuminen lähitulevaisuudessa on erittäin epätodennäköistä.

Taulukko 11 - Raitioliikennejärjestelmään sijoittuvan investoinnin kannattavat suuruudet.

Säästö- potentiaali	Energian hintaa	Säästöä/vuosi	Poisto aika		
	€/kWh		5 vuotta	10 vuotta	20 vuotta
10 %	0,05	141 450 €	629 710 €	1 147 286 €	1 922 352 €
	0,10	282 900 €	1 259 421 €	2 294 572 €	3 844 703 €
	0,15	424 350 €	1 889 131 €	3 441 859 €	5 767 055 €
20 %	0,05	282 900 €	1 259 421 €	2 294 572 €	3 844 703 €
	0,10	565 800 €	2 518 841 €	4 589 145 €	7 689 407 €
	0,15	848 700 €	3 778 262 €	6 883 717 €	11 534 110 €
30 %	0,05	424 350 €	1 889 131 €	3 441 859 €	5 767 055 €
	0,10	848 700 €	3 778 262 €	6 883 717 €	11 534 110 €
	0,15	1 273 050 €	5 667 392 €	10 325 576 €	17 301 165 €

Taulukko 12 - Metroliikennejärjestelmään sijoittuvan investoinnin kannattavat suuruudet.

Säästö- potentiaali	Energian hintaa	Säästöä/vuosi	Poisto aika		
	€/kWh		5 vuotta	10 vuotta	20 vuotta
10 %	0,05	224 050 €	997 431 €	1 817 246 €	3 044 913 €
	0,10	448 100 €	1 994 862 €	3 634 492 €	6 089 825 €
	0,15	672 150 €	2 992 292 €	5 451 739 €	9 134 738 €
20 %	0,05	448 100 €	1 994 862 €	3 634 492 €	6 089 825 €
	0,10	896 200 €	3 989 723 €	7 268 985 €	12 179 650 €
	0,15	1 344 300 €	5 984 585 €	10 903 477 €	18 269 476 €
30 %	0,05	672 150 €	2 992 292 €	5 451 739 €	9 134 738 €
	0,10	1 344 300 €	5 984 585 €	10 903 477 €	18 269 476 €
	0,15	2 016 450 €	8 976 877 €	16 355 216 €	27 404 214 €

Mittausten perusteella kappaleessa 5.2 saatiin laskettua keskimääräinen arvio MLNRV-raitiovaunun yhden jarrutuksen hyödynnettävän jarrutusenergian määrälle. On muistettava, että jarrutukset poikkeavat toisistaan ja että hyödynnettävän energian määrä on sitä pienempi mitä pienemmästä nopeudesta raitiovaunu jarruttaa. Keskimääräiseksi arvioksi saatiin 0,338 kWh/jarrutus. Metrossa jarrutukset ovat kaikki samankaltaisia ja muun muassa suuremmasta nopeudesta johtuen huomattavasti raitiovaunua tehokkaampia. Vanhatalon diplomityössä [7] on saatu laskettua arvo jarrutusenergian määrälle yhdessä jarrutuksessa, joka on 2,3kWh/jarrutus/vp.

Tehdyn selvityksen perusteella superkondensaattorienergiavarastoja voidaan hankkia esimerkiksi 0,33 kWh:n moduuleissa, joita voidaan tarvittaessa kytkeä rinnan useampia. Yksi tällainen moduuli siis olisi melko sopivan kokoinen HKL:n raitiovaunuun tähän työhön tehtyjen mittausten perusteella, sillä varastoon mahtuisi juuri yhdestä jarrutuksesta saatava energia. Raitiovaunu voisi sitten käyttää kyseisen energian vaunun kiihdytykseen. Saatavilla on myös suurempia ja valmiimpia kokonaisuuksia, jotka kokonsa puolesta tulisi sijoittaa syöttöasemalle. Esimerkiksi eräaseen superkondensaattorijärjestelmään pystytään varastoimaan 2,5 kWh käyttökelpoista energiaa eli siihen pystyttäisiin varastoimaan usean samanaikaisen jarrutuksen energiat raitiojärjestelmässä.

Tehdyn selvityksen perusteella 0,33 kWh superkondensaattorienergiavarasto tulisi maksamaan suunnilleen 75 000 euroa asennuksineen, mikäli varasto asennettaisiin syöttöasemalla ylimääräiseen lähtöön, jossa on jo katkaisija. Mikäli järjestelmää varten tulisi hankkia uusi lähtö ja sitä varten katkaisija, lisää se investoinnin hintaa jopa noin 100 000 eurolla. Moduuleja voidaan kytkeä rinnan ja 2,66 kWh:n energiavarastolle tulisi siis näillä määrittelyillä hintaa 600 000 euroa ilman uutta katkaisijaa ja vastaavasti 700 000 euroa uuden katkaisijan kanssa. Selvityksen perusteella suoraan hankittavan 2,5 kWh:n energiavaraston hinnaksi asennuksineen tulisi 640 000 euroa, joten hintaluokka on sama.

Jotta energiavarastojärjestelmien avulla päästäisiin noin 10 %:n energiasäästöihin, tarvittaisiin energiavarastoja joka toiselle syöttöasemalle. Raitiovaunujen syöttöverkossa on tällä hetkellä 23 syöttöasemaa, joten mikäli suunnilleen puolille näistä asennettaisiin energiavarasto, tulisi energiavarastoja hankkia vähintään 11 kappaletta. Tämä tarkoittaisi edellä lasketuilla summilla noin 6,5–7 miljoonan euron investointia. Tätä lukua voidaan verrata taulukkoon 11 ja huomata, että investoitaessa pelkästään energiavarastoihin ja siten saataessa ainoastaan 10 % kokonaisenergiesäästö, investointi ei ole kannattava. Lähes seitsemän miljoonan euron säästö voitaisiin saavuttaa esimerkiksi 20 %:n energiasäästöillä, mikäli energian hinta kolminkertaistuisi ja investoinnin poisto aika olisi kymmenen vuotta. Kaikkien kohtien toteutuminen on kuitenkin melko epätodennäköinen skenaario.

Metrojärjestelmään puolestaan tarvittaisiin suuremmat energiavarastot kuin raitio-tiejärjestelmään, sillä metrojen jarrutuksissa syntyy selvästi enemmän jarrutusenergiaa. Länsimetron tullessa käyttöön metrossa liikennöidään kahden vaunuparin junilla. Mittausten perusteella kahden vaunuparin metrojunan jarrutuksessa syntyy yhteensä 4,6 kWh jarrutusenergiaa. Täten raitiovaunujen syöttöasemallekin riittävä 2,5 kWh:n superkondensaattorienergiavarasto ei ole riittävän suuri metron jarrutusenergian

talteenottoon syöttöasemalla, sillä se pystyy varastoimaan määrällisesti ainoastaan yhden vaunuparin jarrutusenergian.

Vauhtipyöräjärjestelmissä on kuitenkin käytössä hieman suurempia energiavarastoja, esimerkiksi 5 kWh:n järjestelmä Hampurin Hochbahnilla [40]. Tosin tämäkin järjestelmä kykenisi vastaanottamaan ainoastaan yhden metrojunan jarrutuksen kerrallaan. Sähkönsyöttöasemalle sijoitettavan energiavaraston tulisi siis olla vielä suurempi, jotta useamman vaunun samanaikaiset jarrutukset saataisiin hyödynnettyä. Metrojunat tosin jarruttavat raitiovaunuja harvemmin ja normaalitilanteissa ainoastaan metroasemille. Näin ollen päällekkäisiä jarrutuksia tulee vähemmän kuin raitiotiejärjestelmässä ja energiavarastoa ei tarvitse mitoittaa kuin muutamalle yhtäaikaiselle jarrutukselle. Toki järjestelmä voidaan hankkia, vaikka se ei pystyisikään vastaanottamaan kaikkea energiaa kaikissa tilanteissa, mikäli todetaan, että talteenotetun energian määrä esimerkiksi 5 kWh:n energiavarastolla saadaan säästettyä riittävästi energiaa investoinnin hintaan nähden.

Tämän työn yhteydessä ei selvitetty vauhtipyöräenergiavaraston mahdollista hintaa, joten kannattavan investoinnin summaa vauhtipyöräjärjestelmälle ei voida laskea. Mikäli kannattavuutta lasketaan 5 kWh:n superkondensaattorienergiavaraston hinnoilla ja energiavarasto sijoitettaisiin joka toiselle sähkönsyöttöasemalle 10 %:n energiansäästön saavuttamiseksi, tulisi investoinnin arvoksi yhteensä noin 6–7 miljoonaa euroa. Energiavarastoja olisi tällöin Helsingin metron yhdestätoista sähkönsyöttöasemasta viidellä. Verrattaessa lukuja taulukon 12 arvoihin, voidaan todeta investoinnin olevan kannattava 10 %:n energiasäästöllä ainoastaan energian hinnan kolminkertaistuessakin ja poistoajan ollessa 20 vuotta. Tämä on kuitenkin erittäin epätodennäköinen skenaario, joten voidaan todeta investoinnin olevan käytännössä kannattamaton. Metroliikenteessä olisi siis viisaampaa käyttää jarrutusenergiaa hyödyksi vaunun omiin tarpeisiin tai syöttää sitä metroaseman omakäyttöön, kuten esimerkiksi liukuportaisiin ja valaistukseen.

Energiavarastoesimerkit maailmalta ovat usein joko raitiovaunu- tai pikaraitiotiejärjestelmistä. Metrojärjestelmät tarvitsisivat huomattavasti suuremmat energiavarastot, kuten edellä mainituista arvoista voidaan päätellä. Toki raitiovaunuilla on samanpituisen matkan aikana useampia jarrutuksia, mutta niin on myös kiihdytyksiäkin. Esimerkiksi Nürbergissä, Saksassa, on käytössä superkondensaattorijärjestelmä, johon voidaan säilöä 2,5 kWh energiaa. Hampurin Hochbahnilla puolestaan on käytössä vauhtipyöräjärjestelmä, johon voidaan varastoida 5 kWh energiaa. [40]

Liikkuvaan kalustoon sijoitettava energiavarasto voisi puolestaan olla kooltaan pienempi, sillä tällöin varastoitua jarrutusenergiaa käyttää hyödykseen ainoastaan jarruttava vaunu itse. Liikkuvaan kalustoon voidaan siis sijoittaa pienempi energiavarasto kuin sähkönsyöttöasemalle, jonne sijoitettavan energiavaraston tulee pystyä varastoimaan usean vaunun mahdolliset yhtäaikaiset jarrutusenergiat. Vaunun kiihdytykseen kuluu enemmän energiaa kuin jarrutuksessa syntyy, joten liikkuvan kaluston energiavarasto tulisi mitoittaa vaunusta normaalikäytössä saatavan suurimman mahdollisen jarrutusenergian mukaan.

8 Yhteenveto

Tässä diplomityössä tutkittiin HKL:n kaluston ja järjestelmien nykyisiä jarrutusenergian hyödyntämismenetelmiä sekä pohdittiin uusia vaihtoehtoja jarrutusenergian talteenottoon kyseisessä kalustossa. Raideliikenne laajentuu melkoisesti seuraavan kymmenen vuoden aikana, mikä johtaa liikennöinnin lisääntymiseen ja siten kokonaisenergiankulutuksen kasvuun. Näin ollen energiansäästökysymykset, joihin myös jarrutusenergian talteenotto kuuluu, tulevat yhä ajankohtaisemmiksi myös taloudellisesta näkökulmasta.

HKL:n raitio- ja metrovaunut käyttävät jo nyt jarrutusenergiaa hyödykseen, pääosin matkustamon lämmitykseen. Kaikissa kolmessa metrovaunutyypissä on käytössä samanlainen järjestelmä: jarruttaessa energia siirtyy jarruvastuksille, joissa se muuttuu lämmöksi, jota tarpeen tullen käytetään hyödyksi matkustamon lämmitykseen.

Raitiovaunuissa MLNRV- ja NRV-vaunutyypit käyttävät energiaa hyödykseen metrojärjestelmää vastaavalla tavalla, jarruvastusten lämmittäessä ilmaa, jota tarpeen tullen ohjataan matkustamoon. Uudemmat Variotram-vaunut puolestaan yrittävät syöttää syntyvää jarrutusenergiaa syöttöverkkoon muiden raitiovaunujen käyttöön, mutta mikäli samalla syöttöjaksolla ei ole samaan aikaan toista vaunua kiihdyttämässä, käyttää vaunu energiaa omiin apukäyttöihinsä. Ylimääräisen energian vaunutyyppi muuttaa lämmöksi jarruvastuksissa ja puhaltaa ulos. Uusimmissa Artic-vaunuissa on puolestaan yhdistelty näitä kahta järjestelmää; jarrutusenergiaa yritetään ensiksi syöttää toisten vaunujen käytettäväksi syöttöverkkoon ja sen jälkeen sitä hyödynnetään matkustamon lämmitykseen. Artic-vaunuissa jarruvastukset kuitenkin lämmittävät vesijärjestelmää, jonka avulla energiaa saadaan hyödynnettyä MLNRV-vaunujen ilmajärjestelmää paremmin.

Energian varastointitekniikoita on useita, joista tutuimpia monille lienevät akut. Akkuja on monenlaisia ja niitä käytetään jo sähköautoissa ja -busseissa varastoimaan energiaa ja ottamaan talteen jarrutusenergiaa. Raideliikenteen vaatimuksiin akut eivät kuitenkaan ole soveltuvimpia energiavarastoja usein lyhyen eliniän ja alhaisen tehotiheyden takia. Superkondensaattorit ja vauhtipyörä puolestaan ovat tekniikoita, joilla nämä ominaisuudet ovat parempia, ja ne siten soveltuvat raideliikenteen jarrutusenergian talteenottoon huomattavasti paremmin.

Työhön sisältyivät myös MLNRV I -raitiovaunutyypillä tehdyt käytännön jarrutusenergiamittaukset, joiden perusteella saatiin laskettua hyötykäyttöön saatavan jarrutusenergian määrä. Mittausten perusteella vaunussa syntyy talteenotettavaa jarrutusenergiaa 1,203 kWh/km, mikä on noin 26 % vaunun käyttämästä energiasta. M100-sarjan metrolla on mitattu vastaavasti jarrutusenergian määräksi 1,64 kWh/km/vp, mikä puolestaan on suunnilleen 27 % yhden metron vaunuparin ottamasta energiasta [7].

Raitiovaunumittausten yhteydessä huomioitiin myös, ettei vaunun säätöpellin ohjaus toiminut ideaalisesti ja siten jarrutusenergiaa ei käytetä hyödyksi niin paljon kuin sitä voitaisiin käyttää. Lisäksi energiansa suoraan linjasyötöstä ottava lisälämpövastus meni päälle liian aikaisin ja siten aiheuttaa turhaa energiankulutusta. Ohjaukset tullaan säätämään energiatehokkaampaan asentoon.

Jarrutusenergiaa menee MLNRV-vaunuissa kuitenkin hukkaan huomattavasti koko ajan järjestelmän rakenteen takia, joten tehokkaampaa olisi varastoida syntyvä jarrutusenergia energiavarastoon, josta energia voitaisiin käyttää uudelleen kiihdytykseen. Energiavarastojärjestelmät ovat kuitenkin melko kalliita, ja siksi maailmalla järjestelmiä on toistaiseksi käytössä vasta muutamia. Superkondensaattorit ovat kuitenkin vielä suhteellisen uutta teknologiaa, jolla on hyvät kehitysnäkymät; energia- ja tehotehyyden odotetaan parantuvan ja hintojen alentuvan.

Työssä tehtiin kannattavuuslaskelmia mahdolliselle jarrutusenergian talteenoton investoinnille. Herkkyystarkastelussa käytettiin melko suuria energian hinnan nousun arvioita nykyisen hinnan lisäksi, mutta rahalliset energiasäästöt jäivät silti melko pieniksi. Nykyisillä energiavarastojen hinnoilla jarrutusenergian talteenottojärjestelmien hankkiminen on kannattamatonta, mutta etenkin superkondensaattoreiden kehitystä on hyvä seurata tulevaisuudessa.

Energiankulutusta voidaan pienentää myös muilla keinoilla, kuten esimerkiksi opastamalla kuljettajia ajamaan ekologisesti sekä seuraamalla jollain asteella tästä suoriutumista. Raitiovaunuilla energiankulutusta voidaan pienentää myös liikenteen sujuvoittamisella, esimerkiksi antamalla raitiovaunuille etuajo-oikeuksia tai pidentämällä pysäkkivälejä, jolloin pysäkkien välillä ajamisesta voisi tulla tehokkaampaa.

Tämän työn jatkoksi olisi hyvä tehdä omat jarrutusenergiamittaukset myös Artic-vaunuille, sillä vaunuja on tulossa lähivuosina huomattavasti lisää ja ne ovat käytössä vielä vuosikymmeniä. Mikäli HKL haluaa investoida energiavarastoihin jarrutusenergian talteenotossa, olisi hyvä ensin selvittää Artic-vaunujen jarrutusenergian hyötykäyttö ja sen perusteella miettiä mahdollisten investoinnin kannattavuutta uudelleen.

Energian talteenotto energiavarastojen avulla ei tämän työn tulosten pohjalta ole taloudellisesti kannattavaa tällä hetkellä tai lähitulevaisuudessa. Toistaiseksi onkin siis kannattavampaa parantaa olemassa olevien järjestelmien energiatehokkuutta sekä pohtia muita, pienempiä asioita energian säästämiseksi. Uutta kalustoa hankittaessa on kuitenkin hyvä varautua energiavarastoihin ja energian takaisinsyöttöön, sillä raideliikenteen kalustot ovat pitkäikäisiä ja tekniikoiden kehittyessä esimerkiksi energiavarastot voivat tulla entistä kannattavammiksi sijoituksiksi. On toki myös muistettava, että HKL:n ollessa julkinen liikennelaitos, päätöksentekoon vaikuttavat myös poliittiset linjaukset eivätkä välttämättä ainoastaan kustannukset. Helsingin kaupungilla on oma ympäristösuunnitelmansa, jonka tavoitteet vaikuttaa päätöksiin.

9 Lähdeluettelo

- [1] Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto. Helsingin yleiskaava (Luonnos, 25.11.2014). 2014. Viitattu 9.12.2014. Saatavissa: http://www.hel.fi/hel2/ksv/julkaisut/yos_2014-44.pdf.
- [2] Helsingin kaupunki. Strategiaohjelma 2013-2016. 2013. Viitattu 9.12.2014. Saatavissa: http://www.hel.fi/static/taske/julkaisut/2013/Strategiaohjelma_2013-2016_Kh_250313.pdf.
- [3] Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto. Helsingin yleiskaava — Kanta-kaupungin ja ydinkeskustan kehittäminen. 2014. Viitattu 9.12.2014. Saatavissa: http://www.hel.fi/hel2/ksv/julkaisut/yos_2014-18.pdf.
- [4] Helsingin ja Espoon kaupungit. Raide-Jokeri. Viitattu 10.12.2014. Saatavissa: <http://raidejokeri.info/>.
- [5] Helsingin kaupungin liikennelaitos. Helsingin raitioliikenteen kokonaiskehittämisselvitys. 2009. Viitattu 13.10.2014. Saatavissa: https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/helsingin_raitioliikenteen_kokonaiskehittamisselvitys.pdf.
- [6] Länsimetro Oy. Länsimetro. Viitattu 10.9.2014. Saatavissa: <http://www.lansimetro.fi>.
- [7] Elisa Vanhatalo. Jarrutusenergian hyötykäyttömahdollisuuksia Helsingin metroliikenteessä. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2012.
- [8] Antero Alku. *Raitiovaunu tulee taas*. Kustantaja Eero Laaksonen, 2002.
- [9] Helsingin kaupungin liikennelaitos. HKL | Helsingin kaupunki. Viitattu 10.9.2014. Saatavissa: <http://www.hel.fi/www/hkl/fi>.
- [10] HKL-Raitioliikenne. Raitiovaunuliikenteen kehitys. Sisäinen dokumentti, 2013.
- [11] Helsingin kaupungin liikennelaitos. Toimintakertomus. 2013. Viitattu 4.9.2014. Saatavissa: http://www.hel.fi/hki/hkl/fi/Tietoja+HKL_sta/Toimintakertomukset.
- [12] Bombardier Transportation Finland Oy. Tekninen kuvaus, Helsingin matalalattiaraitiovaunu. 2009.
- [13] Rauno Lipponen ja Teemu Naskali, Projekti- ja sähköinsinööri, HKL-Infrapalvelut. Haastattelu 2.9.2014.
- [14] Rauno Lipponen. Raitiotien rata-alueen sähkötyöturvallisuuskoulutus. Sisäinen dokumentti, 2014.
- [15] Pekka Varis, Tekninen tukihenkilö, HKL-Raitioliikenne. Haastattelu 2015.
- [16] Ollipekka Heikkilä, Kehittämispäällikkö, HKL-Raitioliikenne. Haastattelu 4.11.2014.

- [17] Tapio Tolmunen. *Tunnelijunasta suosikiksi – Helsingin metro 25 vuotta*. HKL, 2007.
- [18] Wikipedia. Helsinki Metro Map 2007. 2007. Viitattu 1.12.2014. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Helsinki_Metro#mediaviewer/File:Helsinki_metro_map_2007.png.
- [19] Östersundom-toimikunta. Östersundomin yleiskaavaehdotus. 2014. Viitattu 12.12.2014. Saatavissa: <http://yhteinenostersundom.fi/yleiskaava/kaavaehdotus>.
- [20] Otso Kivekäs. Helsingin automaattimetro 1974 – 2014. 18.12.2014. Viitattu 24.2.2015. Saatavissa: <http://otsokivekas.fi/2014/12/helsingin-automattimetro-1974-2014/>.
- [21] Helsingin kaupungin liikennelaitoksen johtokunta. Pöytäkirja 20/2014. 18.12.2014. Viitattu 11.2.2015. Saatavissa: <http://www.hel.fi/www/hkl/fi/paatoksenteke/Paatosisiikirjat/>.
- [22] Strömberg. Metrojuna 107-184 huolto- ja korjausohjeet: S01.1 Huolto-ohje Pääkäyttö 750 V DC. Sisäinen dokumentti, 1983.
- [23] Bombardier. Metrojunan rakenne M200. Sisäinen dokumentti, 2000.
- [24] Strömberg. Metrojuna 107-184 Huolto- ja korjausohjeet: S50.2 Huolto-ohje Jarruvastusyksikkö. Sisäinen dokumentti, 1980.
- [25] HKL-Metroliikenne. Ratasähköistys. Sisäinen dokumentti, 2009.
- [26] Helen Oy. Länsimetron rakentaminen Helsingistä Espooseen etenee. 12.5.2014. Viitattu 22.1.2015. Saatavissa: <https://www.helen.fi/Uutiset/2014/Lansimetro/>.
- [27] HKL-Metroliikenne. Metrovaunuyksikön sähköjärjestelmä. Sisäinen dokumentti, 2013.
- [28] HKL-Rakennusyksikkö, Sähkötiimi. Jarrutusenergian talteenotto. Sisäinen dokumentti, 2008.
- [29] Trolley Project EU. Energy Storage Systems in the Catenary Grid of Light Rail and Trolleybus Systems. 2013. Viitattu 20.2.2015. Saatavissa: <http://www.trolley-project.eu/index.php?id=44>.
- [30] Braham Ferreira ja Wim van der Merwe. *The principles of electronic and electromechanic power conversion: a systems approach*. John Wiley & Sons Inc., 2014.
- [31] Ville Erkkilä. Advanced battery testing methods. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2012.
- [32] Sergio Vasques et al. Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, nro 20, 2010.
- [33] Samu Kukkonen. Current Trends in Battery Technology. ECV-seminaari, Espoo, 2014.

- [34] Adrian Ioinovici. *Power electronics and energy conversion systems. 1, Fundamentals and hard-switching converters*. Wiley, 2013.
- [35] Mitre. Supercapacitors: A Brief Overview. 2006. Viitattu 14.1.2015. Saatavissa: http://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06_0667.pdf.
- [36] Isidor Buchmann. Battery University. Viitattu 14.1.2015. Saatavissa: <http://batteryuniversity.com/>.
- [37] Paul Kreczanik, Pascal Venet, Alaa Hijazi ja Guy Clerc. *Study of Supercapacitor Aging and Lifetime Estimation According to Voltage, Temperature, and RMS Current*. IEEE, 2014.
- [38] Helsingin seudun liikenne. Ajoneuvo- ja polttoainetekniikan mahdollisuudet autoliikenteen päästöjen vähentämisessä. 2014. Viitattu: 20.10.2014 Saatavissa: https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/ajoneuvo_ja_polttoainetekniikan_mahdolliset_autoliikenteen_paastojen_vahentamisessa.pdf
- [39] Helsingin seudun liikenne. Hallituksen pöytäkirja, Pykälä 7. 20.1.2015. Viitattu 12.2.2015. Saatavissa: <http://hsl01.hosting.documenta.fi/kokous/2015392-7.HTM>.
- [40] Egid Schneider. Betrachtungen zum Gesamtenergiebedarf von Gleichstrombahnen. Siemens AG, 2010.
- [41] Hochbahn. HHA Energiespeicher Rückwinnung. Esite, 2009.
- [42] Petri Norrena, Korjaamopäällikkö, HKL-Raitioliikenne. Haastattelu 10.12.2014.
- [43] CAF. M300-junien tarjous. Sisäinen dokumentti, 2012.
- [44] Tapio Hölttä, Metroliikennejohtaja, HKL-Metroliikenne. Haastattelu 3.11.2014.
- [45] Tampereen kaupunki. Tampereen raitiotien yleissuunnitelma. 2014. Viitattu: 31.3.2015. Saatavissa: <http://www.tampere.fi/material/attachments/t/Rl1dsMYe/tampereenraitiotieyleissuunnitelma.pdf>.
- [46] Hitachi. Hitachi Review Vol. 61, No. 7. 2012. Viitattu 4.2.2015. Saatavissa: http://www.hitachi.com/rev/pdf/2012/r2012_07_104.pdf.
- [47] Mitsubishi Electric Corporation. Mitsubishi Electric's S-EIV® Saves on Power for Tokyo Metro. 18.9.2014. Viitattu 10.2.2015. Saatavissa: <http://www.mitsubishielectric.com/news/2014/0918.html>.
- [48] KONE. Metron energiamittaukset. Sisäinen dokumentti, 2013.
- [49] Helsingin kaupungin liikennelaitos. Ympäristöraportti 2013. Viitattu 16.12.2014. Saatavissa: http://www.hel.fi/static/hkl/ymparistoraportti/ymparistoraportti_2013.pdf.
- [50] Oikeusministeriö. Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta. Viitattu 16.12.2014. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19961260>.

